ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ

МАТЕРІАЛИ XXVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

21–23 травня 2025 року
КИЇВ

RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE XXI CENTURY

MATERIALS OF THE XXVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

May 21–23, 2025
KYIV

МАТЕРІАЛИ XXVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ

21–23 травня 2025 року
КИЇВ

MATERIALS OF THE XXVI INTERNATIONAL SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE

DOI: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-2305.2025

RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE XXI CENTURY

May 21–23, 2025
KYIV

УДК 620.91
В 42

Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту відновлюваної енергетики Національної
В 42 академії наук України (Протокол №12 від 05.05.2025)

ISBN 978-966-999-130-25
УДК 620.91

Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті:
матеріали XXVI міжнародної науково-практичної конференції
(Київ, 21–23 травня 2025).– К.: Інституту відновлюваної енергетики НАН України, 2025.– 574 с.

У збірнику викладено матеріали доповідей учасників конференції, присвяченої розвитку відновлюваної енергетики з метою подальшого використання відновлюваних джерел енергії для отримання додаткових обсягів теплової та електричної енергії з метою реалізації заходів з енергозбереження та енергоефективності в суспільстві.

Матеріали рекомендовано для науковців, викладачів, фахівців підприємств, аспірантів та студентів, які займаються вирішенням проблем енергозбереження та енергоефективності в суспільстві.

Відповідальні за випуск:

Директор Інституту відновлюваної енергетики НАНУ,
член-кореспондент НАНУ, д-р техн. наук, професор **Кудря С. О.**

Заступник директора з наукових питань
Інституту відновлюваної енергетики НАНУ, д-р техн. наук **Зур'ян О. В**.
Вчений секретар
Інституту відновлюваної енергетики НАНУ, д-р техн. наук **Суржик Т. В.**

РЕДАКЦІЙНА РАДА

Кудря С. О., д-р техн. наук, чл.-кор. НАНУ
Зур'ян О. В., д-р. техн. наук
Суржик Т. В., д-р техн. наук
Рєпкін О. О., д-р філ.
Кузнецов М. П., д-р техн. наук
Васько П. Ф., д-р техн. наук
Морозов Ю. П., д-р техн. наук
Головко В. М., д-р техн. наук
Будько В. І., д-р техн. наук
Клюс В. П., канд. техн. наук
Яценко Л. В., н.с.

Думка редакційної ради може не співпадати з поглядами авторів матеріалів. Матеріали друкуються в авторській редакції. При цитуванні посилання на джерело обов'язкове. Редакція не несе відповідальність за достовірність інформації, надану авторами.

© Колектив авторів, 2025
© Інститут відновлюваної енергетики НАНУ,
укладання, оформлення 2025

ISBN 978-966-999-130-25

ОРГАНІЗАТОРИ

- Інститут відновлюваної енергетики НАН України
- КПІ ім. Ігоря Сікорського
- Представництво Польської академії наук у м. Києві
- Варшавська політехніка
- Громадська спілка «Енергетична асоціація «Українська воднева рада»
- Міжгалузевий науково-технічний центр вітроенергетики ІВЕ НАН України
- Кафедра ЮНЕСКО «Вища технічна освіта, прикладний системний аналіз та інформатика» при КПІ ім. Ігоря Сікорського та ННК «Інститут прикладного системного аналізу»
- Мала академія наук України
- МНТЦ трансферу технологій відновлюваної та водневої енергетики
- Інститут загальної енергетики НАН України
- Інститут технічної теплофізики НАН України
- Український національний комітет з тепло- і масообміну

ЗА ПІДТРИМКИ:

- Національної академії наук України
- Громадської спілки «Енергетична асоціація «Українська воднева рада»
- Представництва Польської академії наук у м. Києві
- IVL Шведського інституту екологічних досліджень
- Наукової ради з проблеми «Наукові основи електроенергетики»
- Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України
- Науково-технічної спілки енергетиків та електротехніків України
- Факультету електроенерготехніки та автоматики, кафедри відновлюваних джерел енергії КПІ ім. Ігоря Сікорського
- Андижанського державного університету імені З. М. Бабура
- EUROSOLAR-Україна
- Українсько-Польського Центру КПІ ім. Ігоря Сікорського
- Асоціації машинобудування і вітроенергетики
- Проекту ЮНІДО/ ГЕФ «Глобальна інноваційна програма екологічно чистих технологій для малих та середніх підприємств України»
- Асоціації промислових ВЕС України
- Hydrogen Europe

СПОНСОР КОНФЕРЕНЦІЇ:

- Громадська спілка «Енергетична асоціація «Українська воднева рада»

ІНФОРМАЦІЙНА ПІДТРИМКА

- Науково-прикладний журнал «Відновлювана енергетика»
- Сайт конференції КПІ ім. Ігоря Сікорського: **www.konf.ive.kpi.ua**
- Сайт ІВЕ НАН України: **www.ive.org.ua**
- Сайт кафедри ВДЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського: **www.vde.kpi.ua**
- Газета «Київський політехнік»: **www.kpi.ua.kp**

ВІТАЛЬНІ СЛОВА УЧАСНИКАМ КОНФЕРЕНЦІЇ 29

СЕКЦІЯ «КОМПЛЕКСНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ НВДЕ»

МІКРОМЕРЕЖІ ЯК ЧАСТИНА ОПТИМІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО РИНКУ
М. П. Кузнєцов 35

MICROGRIDS AS PART OF AN OPTIMIZED ELECTRICITY MARKET
M. Kuznietsov 35

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ІНТЕГРОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ ВІД НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ
І. О. Гунько, П. Д. Лежнюк 37

FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE INTEGRATED ENERGY SYSTEM FOR ELECTRICITY SUPPLY TO CONSUMERS FROM LOW-CARBON ENERGY SOURCES
I. Hunko, P. Lezhniuk 37

ЛОКАЛЬНА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ ВДЕ ЯК СУКУПНІСТЬ АГРЕГОВАНИХ MICROGRID
П. Д. Лежнюк, О. С. Кульматицький, Є. О. Нікіторович 39

LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEM BASED ON RSE AS A SET OF AGGREGATED MICROGRID
p. Lezhniuk, O. Kulmatytskyi, E. Nikitorovych 39

THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY IN GLOBAL ENERGY SECURITY STRATEGIES
A. Mammadzada 41

SCIENCE-BASED APPROACH FOR EFFICIENT DECISION MAKING IN THE ENERGY TRANSITION- THE CASE OF DISTRICT HEATING NETWORKS
K. Lygnerud, M. Cozzini, A. Menapace, T. Brahim, A. Radoszynski, K. Karlsson,
O. Diachuk, R. Podolets, A. Semeniuk, O. Lysenko 42

FROM DEEP ENTRY IN ENERGY SUPPLY SYSTEMS PROCEDURE FOR USE
D. Adbukhalilov, A. Taslimov, O. Mirkomilov 44

DEVELOPMENT OF RESEARCH ON RENEWABLE ENERGY SOURCES AND INCREASING THE CAPACITY OF HEI IN THE RUZ THROUGH THE IMPLEMENTATION OF THE ERASMUS+ PROGRAM
Rayimjon Aliev, Mahfuza Alinazarova 47

AUTONOMOUS HYBRID MICROPOWER STATION FOR USERS IN WARM CLIMATIC REGIONS
E. A. Goipov 49

THE INFLUENCE OF ELECTRIC FIELD ON THE MOTION OF ELECTRONS IN MULTILAYER QUANTUM NANOSTRUCTURES
M. Nosirov, S. Matboboyeva, N. Yuldasheva, R. Aliev 50

AUTONOMOUS HYBRID MICROPOWER STATION FOR USERS IN WARM CLIMATIC REGIONS
E. A. Goipov 52

PREPARATION OF MICRO-SIZED GRANULAR ZN-SB COMPOUND
Utkirbek Akhmadaliev 53

PREPARATION AND ELECTROPHYSICAL STUDY OF VARISONIC SOLID SOLUTIONS
A. Razzokov, D. Koshchanova, R. Otajonova 54

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF DIFFERENT TYPES OF GENERATORS IN A LOW-TEMPERATURE ORC SYSTEM
Andrzej Grzebielec, Adam Szelągowski, Paweł Szostak 55

MODELING AND ANALYSIS OF LIGHTING SYSTEMS IN THE ROOM OF A BANK
Feven Abraham Asnake, Artur Rusowicz 57

ANALYSIS OF AN R290 HEAT PUMP WITH A REGENERATOR BASED ON EXPERIMENTAL DATA
Katarzyna Katana, Andrzej Grzebielec 59

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ДЛЯ ОДНОЧАСНОГО ОТРИМАННЯ ТЕПЛОТИ І ХОЛОДУ НА ФАРМАЦЕВТИЧНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ
І. В. Перепелиця, О. В. Зур'ян 61

FEATURES OF USING A HEAT PUMP FOR SIMULTANEOUS HEAT AND COLD PRODUCTION AT A PHARMACEUTICAL ENTERPRISE
I. Perepelytsia, O. Zurian 61

ON THE POSSIBILITY OF LEVERAGING DIGITAL VIDEO CAMERAS FOR LIGHTNING STRIKE DETECTION IN SMART GRID SYSTEMS
Y. Trotsenko, A. Harford 65

ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ВІДЕОКАМЕР ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ УДАРІВ БЛИСКАВКИ В СИСТЕМАХ SMART GRID
Є. О. Троценко, А. Г. Харфорд 65

ДО МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ІЗ ЗАМКНУТИМ ЦИКЛОМ РОБОТИ
В. М. Головко, Р. Ю. Семененко 67

TO THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE EFFICIENCY OF A PUMPED STORAGE POWER PLANT WITH A CLOSED CYCLE OPERATION
V. Golovko, R. Semenenko 67

ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ
О. В. Остапчук, М. П. Болотний 69

MEANS OF MODELING LOCAL ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES
O. Ostapchuk, M. Bolotnyi 69

НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ПІДСИСТЕМАХ ЕЕС З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ПРИСТРОЯМИ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ
Є. І. Бардик, І. В. Заклюка 71

FUZZY MODELLING OF VOLTAGE REGULATION PROCESSES IN POWER SYSTEM SUBSYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION BY ON-LOAD TAP-CHANGERS OF POWER TRANSFORMERS
E. Bardyk, I. Zakliuka 71

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА
НА ЙМОВІРНІСТЬ ВІДМОВИ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯХ
Є. І. Бардик, Я. С. Коваль 74

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF POWER OIL TRANSFORMER LOADING CAPACITY PARAMETERS ON THE PROBABILITY OF FAILURE DURING OVERLOADS
E. Bardik, Y. Koval 74

ВИБІР СТРУКТУРИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЛОКАЛЬНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ
Т. П. Нечаєва, В. А. Денисов 78

DETERMINING THE STRUCTURE OF DISTRIBUTED GENERATION OF THE LOCAL POWER SYSTEM
T. Nechaieva, V. Denysov 78

SOME FEATURES OF USING THE IEC 61850 IN RENEWABLE ELECTRICAL EQUIPMENT DIAGNOSTIC SYSTEMS
B. Samkov, V. Zvaritch 80

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТУ IEC 61850 В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ
Б. О. Самков, В. М. Зварич 80

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМАХ УКРАЇНИ
В. О. Комар, Р. М. Насадюк, Я. С. Таранюк 82

FEATURES OF THE APPLICATION OF DEMAND-SIDE MANAGEMENT SYSTEMS IN UKRAINE'S LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEMS
V. Komar, R. Nasadiuk, Ya. Taranyuk 82

СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗУМНИХ МЕРЕЖ ТА МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З ПІДВИЩЕНОЮ ВІДМОВОСТІЙКІСТЮ
В. В. Коваль, О. В. Самков, В. І. Вакась, О. М. Піскун, Б. О. Самков 84

SYNCHRONIZATION SYSTEMS FOR SMART NETWORKS AND MOBILE TELECOMMUNICATIONS WITH ENHANCED FAULT RESILIENCE
V. Koval, O. Samkov, V. Vakas, O. Piskun, B. Samkov 84

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИКЛІ СПРАЦЬОВУВАННЯ АДАПТИВНОГО ОДНОФАЗНОГО ПОВТОРНОГО ВВІМКНЕННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ
В. Г. Кузнецов, В. В. Кучанський, В. В. Шевчук, В. І. Кошман 86

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN THE OPERATION CYCLE OF ADAPTIVE SINGLE-PHASE RE-TURNING OF HIGH-VOLTAGE LINES
V. Kuznetsov, V. Kuchansky, V. Koshman, V. Shevchuk 86

АНАЛІЗ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ
Ю. І. Тугай, І. Ю. Тугай, Л. Р.Сабарно, І. М. Севастюк 88

FERRORESONANCE ANALYSIS OF PROCESSES IN ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS
Yu. Tuhai, I. Tuhai, L. Sabarno, I. Sevastiuk 88

ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН У МЕРЕЖАХ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ
О. С. Яндульський, А. А. Марченко, В. С. Гулий, Р. М. Татусь 90

IMPLEMENTATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY ELEMENTS IN DISTRIBUTED GENERATION NETWORKS
O. Yandulskyi, A. Marchenko, V. Hulyi, R. Tatus 90

ОСОБЛИВОСТІ ПРІОРИТЕТІВ І ПРАКТИК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА КЛІМАТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ
Н. М. Фіалко, М. П. Тимченко, Ю. В. Шеренковський, Н.О. Меранова 92

FEATURES OF PRIORITIES AND PRACTICES OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND CLIMATE SECURITY
N. Fialko, M. Tymchenko, Ju. Sherenkovskii, N. Meranova 92

СУЧАСНЕ ГЛОБАЛЬНЕ ПОТЕПЛІННЯ Й ЕНЕРГЕТИЧНИЙ, ЗЕЛЕНИЙ ТА ЦИФРОВИЙ ПЕРЕХІД
Н. М. Фіалко, М. П. Тимченко, Ю. В. Шеренковський, Н. О. Меранова 93

MODERN GLOBAL WARMING AND THE ENERGY, GREEN AND DIGITAL TRANSITION
N. Fialko, M. Tymchenko, Ju. Sherenkovskii, N. Meranova 93

СТАН НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЇ БАЗИ У СФЕРІ ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ «ЗЕЛЕНИХ» ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
О. О. Рубаненко, Я. М. Коваленко 94

STATE OF THE LEGAL AND REGULATORY FRAMEWORK IN THE FIELD OF "GREEN" HYBRID POWER PLANTS
O. Rubanenko, Y. Kovalenko 94

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ РЕЖИМУ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ
М. П. Болотний 96

ENSURING THE STABILITY IN MODERN ELECTRICAL POWER SYSTEMS
M. Bolotnyi 96

АНАЛІЗ ТРЕНДУ ПОГОДИННОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ ЕКСПОНЕНЦІЙНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ
С. І. Ковтун, Ю. В. Куц, Б. Б. Млинко, М. Є. Фриз 98

TREND ANALYSIS OF HOURLY ELECTRICITY CONSUMPTION OF ORGANIZATION BASED ON EXPONENTIAL SMOOTHING LINEAR MODEL
S. Kovtun, Y. Kuts, B. Mlynko, M. Fryz 98

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ
О. І. Тесленко, Г. О. Тарасенко 100

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL STRUCTURES OF LOCAL POWER SYSTEMS
O. Teslenko, G. Tarasenko 100

ОЦІНКА РЕЖИМНОЇ НАДІЙНОСТІ ПІД ЧАС КАСКАДНИХ АВАРІЙ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ВЕЛИКОЮ ЧАСТКОЮ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ
Є. І. Бардик, О. Л. Бондаренко 102

ASSESSMENT OF REGIME RELIABILITY IN CASE OF CASCADE FAILURES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH A LARGE SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES
Ye. Bardyk, O. Bondarenko 102

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ ПІДСИСТЕМ ЕЕС З ОБ'ЄКТАМИ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
Є. І. Бардик, О. Л. Бондаренко 104

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF VACUUM CIRCUIT BREAKERS IN EPS SUBSYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY FACILITIES
Ye. Bardyk, O. Bondarenko 104

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ
І. О. Гунько, В. М. Лисий, О. А. Ковальчук 106

DETERMINING THE ORIGIN OF ELECTRICITY FROM LOW-CARBON ENERGY SOURCES FOR CONSUMERS
I. Hunko, V. Lysyi, O. Kovalchuk 106

ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ЕНЕРГОГЕНЕРУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ
М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, Є. О. Тітов, О. О. Базаров 108

EXPERIENCE IN OPERATING AUTONOMOUS ELECTROMECHANICAL ENERGY GENERATING DEVICES
M. Kovalenko, I. Kovalenko, Y. Titov, O. Bazarov 108

КАВІТАЦІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРИ
Д. Ю. Череватський 110

CAVITATIONAL ELECTRIC HEAT GENERATORS
D. Cherevatskyi 110

ЦІЛІСНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ, ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ СИСТЕМ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ
Т. О. Евтухова, Д. С. Карпенко, О. В. Новосельцев, Є. В. Щербина 112

A HOLISTIC ASSESSMENT OF THE SUSTAINABILITY, EFFICIENCY, AND SECURITY OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS
T. Yevtukhova, D. Karpenko, O. Novoseltsev, Y. Shcherbyna 112

СТАБІЛІЗАЦІЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА ПРИ ЗМІННОМУ НАДХОДЖЕННІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ
В. М. Головко, М. М. Бережнюк 114

STABILISATION OF THE STIRLING ENGINE OPERATION UNDER VARIABLE SOLAR RADIATION INPUT
V. Golovko, M. Berezhnyuk 114

FEATURES OF THE APPLICATION OF V-NETWORKS IN DIAGNOSTICS AND CONTROL OF DISCRETE SYSTEMS

V. Dubovyk, A. Bosak, B. Yavorskyi, P. Dushenok, ... 116

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ V-МЕРЕЖ У ДІАГНОСТИЦІ ТА УПРАВЛІННІ ДИСКРЕТНИМИ СИСТЕМАМИ
В. Г. Дубовик, А. В. Босак, Б. Ю. Яворський, П. В. Душенок 116

ВИСОКОШВИДКІСНИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ МАЛОПОТУЖНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ
І. Я. Коваленко, М. А. Коваленко. 118

HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET MOTOR FOR LOW-POWER RENEWABLE ENERGY SYSTEMS
I. Kovalenko, M. Kovalenko, ... 118

ASSESSING OPTIMAL SOLUTIONS TO KEEP UKRAINE'S THERMAL POWER SYSTEMS RUNNING DURING WARTIME
V. Khodakivskyi, D. Karpenko 120

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ
В. А. Баженов 122

USE OF MATHEMATICAL METHODS FOR OPTIMIZATION OF MODERN ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES
V. Bazhenov 122

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ БІОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ В РОЗРІЗІ ДИРЕКТИВИ ЄС З ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ RED III
Т. А. Желєзна 124

ОГЛЯД НАСЛІДКІВ НЕТИПОВИХ ВИПАДКІВ УРАЖЕННЯ БЛИСКАВКОЮ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ
Є. О. Троценко, Я. А. Архипов 126

OVERVIEW OF THE CONSEQUENCES OF UNTYPICAL INCIDENCES OF LIGHTNING STRIKES ON OVERHEAD POWER LINES
Y. Trotsenko, Y. Arkhypov 126

СИСТЕМА ВИБОРУ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ І ГАЗОВИХ КОТЛІВ ДЛЯ ЖИТЛОВИХ ТА АДМІНІСТРАТИВНИХ БУДІВЕЛЬ УКРАЇНИ
В. М. Мамалига, І. В. Сегеда, В. П. Головань 128

SYSTEM FOR SELECTING ALTERNATIVE HEAT SUPPLY OPTIONS BASED ON HEAT PUMPS AND GAS BOILERS FOR RESIDENTIAL AND ADMINISTRATIVE BUILDINGS IN UKRAINE
V. Mamalyga, I. Segeda, V. Holovan 128

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ, УПРАВЛІННЯ ТА ЗАХИСТУ В АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЯХ
І. Я. Коваленко, Л. Г. Горовий 130

USING A MONITORING, CONTROL AND PROTECTION SYSTEM IN BATTERIES
I. Kovalenko, L. Horovyi 130

ПОРІВНЯННЯ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОУСТАНОВОК ТА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УМОВАХ КИТАЮ ТА ІНДІЇ
В. М. Мамалига, О. В. Авраменко 132

COMPARISON OF THE PROSPECTS OF USING WIND TURBINE AND SOLAR POWER PLANTS IN THE CONDITIONS OF CHINA AND INDIA
V. Mamalyga, O. Avramenko 132

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ВДЕ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
І. М. Буратинський 134

DETERMINATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THE OPERATION OF A COMBINED POWER PLANT WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES ON THE ELECTRICITY MARKET
I. Buratynskyi 134

INFLUENCE OF CONTROL OF SYNCHRONOUS GENERATOR COOLING ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE STATOR WINDING
K. A. Kuchynskyi 136

ВПЛИВ РЕГУЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМОТКИ СТАТОРА
К. А. Кучинський 136

ІНОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ
Ю. М. Лаврич, С. В. Плаксін, Ю. В. Шкіль 138

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR CONSTRUCTION OF THE ENERGY SYSTEM
Yu. Lavrich, S. Plaksin, Yu. Shkil 138

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СУШИЛЬНА УСТАНОВКА З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ
В . М. Пазюк, К. М.Самойленко, С. О. Бірюков 140

ENERGY-EFFICIENT DRYING UNIT WITH HEAT PUMP
V. Paziuk, K. SamoilenkoS. Biriukov 140

ДВИГУН СТІРЛІНГА ЯК ЕЛЕМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ
Є. С. Нікітін, В. М. Павленко 144

STIRLING ENGINE AS AN ELEMENT FOR INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF LOCAL POWER SUPPLY SYSTEMS
Y. Nikitin, V. Pavlenko 144

УПРАВЛІННЯ ІНТЕГРАЦІЄЮ НАКОПИЧУВАЧІВ НА БАЗІ ВТОРИННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМАХ З ВДЕ: ПІДХІД НА ОСНОВІ ЦИКЛУ ДЕМІНГА (PDCA)
Г. П. Костенко, А. О. Запорожець 146

MANAGING THE INTEGRATION OF SECOND-LIFE EV BATTERY STORAGE IN COMPLEX RENEWABLE ENERGY SYSTEMS: A PDCA-BASED APPROACH
G. Kostenko, A. Zaporozhets 146

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРУ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ. МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ
С. В. Новицький 148

SIZING OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS USING PHOTOELECTRIC CONVERTERS. METHODS AND APPROACHES
S. Novytskyi 148

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ДАНСЬКОЇ МОДЕЛІ ДЕМОКРАТИЧНОЇ «ЗЕЛЕНОЇ» ЕНЕРГЕТИКИ, НА ПРИКЛАДІ КОБЛІВСЬКОЇ ГРОМАДИ МИКОЛАЇВСЬКОГО РАЙОНУ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ, ЯК ПІЛОТНОГО ПРОЄКТУ СТРАТЕГІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ УКРАЇНИ НА ПЕРІОД ДО 2035 РОКУ
Ю. Л. Борзунов, В. П. Киливник 150

IMPLEMENTATION OF THE DANISH MODEL OF DEMOCRATIC "GREEN" ENERGY ON THE EXAMPLE OF THE KOBLIV COMMUNITY, MYKOLAIV DISTRICT, MYKOLAIV REGION AS A PILOT PROJECT OF GENERATION OF UKRAINE FOR THE PERIOD UNTIL 2035
Yu. Borzunov, V. Kylyvnyk 150

«ТЕХНОЛОГІЧНІ ВИКЛИКИ ТА ІННОВАЦІЇ У ТРАНСПОРТУВАННІ ЗЕЛЕНОГО АМІАКУ ЧЕРЕЗ ЧОРНЕ МОРЕ»
О. О. Рєпкін 153

«TECHNOLOGICAL CHALLENGES AND INNOVATIONS IN THE TRANSPORTATION OF GREEN AMMONIA ACROSS THE BLACK SEA»
O. Riepkin 153

ВІДЕОМОНІТОРИНГ РОЗРЯДІВ БЛИСКАВКИ У ХМАРАХ ДЛЯ АНАЛІЗУ ІНДУКОВАНИХ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ
Є. О. Троценко, А. Г. Харфорд 155

VIDEO MONITORING OF LIGHTNING DISCHARGES IN CLOUDS FOR ANALYSIS OF INDUCED OVERVOLTAGES IN ELECTRICAL CIRCUITS
Y. Trotsenko, A. Harford 155

КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МІСТ УКРАЇНИ
О. О. Рубаненко, М. Р. Аліпатова 157

COMBINED POWER GENERATION SYSTEM FOR DECENTRALISATION OF ENERGY SUPPLY TO CRITICAL INFRASTRUCTURE OF UKRAINIAN CITIES
O. Rubanenko, M. Alipatova 157

ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ЗАДАЧАХ МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
В. П. Малько, Ю. В. Куц, С. І. Ковтун, В. Ю. Куц 159

THE PHASE METHOD OF DETERMINING THE SUPPLY VOLTAGE FREQUENCY IN THE TASKS OF MONITORING THE POWER QUALITY INDICES
V. Malko, Y. Kuts, S. Kovtun, V. Kuts 159

ДИВЕРСИФІКАЦІЯ ПРОЄКТІВ – ШЛЯХ ПІДВИЩЕННЯ ФІНАНСОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ЕНЕРГОСЕРВІСНОЇ КОМПАНІЇ
М. М. Лунін 161

DIVERSIFICATION OF PROJECTS IS A WAY TO INCREASE THE FINANCIAL STABILITY OF AN ENERGY SERVICE COMPANY
M. Lunin 161

АЛГОРИТМ ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖЕВОГО ІНВЕРТОРА В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ
В. О. Войтех 163

ALGORITHM FOR USING A GRID INVERTER IN GRID-OFF MODE WHEN POWERED BY RENEWABLE ENERGY SOURCES
V. Voitekh 163

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ОБМЕЖЕНЬ НА ВИКИДИ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ
О. Є. Маляренко, Н. Ю. Майстренко 165

MATHEMATICAL MODEL FOR FORECASTING ENERGY CONSUMPTION TAKING INTO ACCOUNT THE IMPACT OF RESTRICTIONS ON POLLUTANT EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE
O. Maliarenko, N. Maistrenko 165

ТЕРМІЧНЕ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ПАТОГЕННИХ МІКРООРГАНІЗМІВ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬ
Д. М.Чалаєв, Т. Л. Грабова, П. В. Гончаров, О. М. Гончарова 167

THERMAL AIR CLEANING FROM PATHOGENIC MICROORGANISMS IN CENTRALIZED BUILDING VENTILATION SYSTEMS
D. Chalaev, T. Grabova, P. Goncharov, O. Honcharova 167

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕННИХ ТА МІСЯЧНИХ ОБСЯГІВ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З УРАХУВАННЯМ ДОБОВОЇ ТА СЕЗОННОЇ ЦИКЛІЧНОСТІ В АЗОВО-ЧОРНОМОРСЬКОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ
І. Л. Мазуренко 169

RESEARCH OF DAILY AND MONTHLY VOLUMES OF ELECTRICITY PRODUCTION BY A PHOTOELECTRIC PLANT TAKING INTO ACCOUNT DAILY AND SEASONAL CYCLICITY IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF UKRAINE
I. Mazurenko 169

ОСОБЛИВОСТІ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ГЕНЕРУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ ЯК ЦИКЛІЧНОГО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ
Р. М. Сисак 171

PECULIARITIES OF STATISTICAL ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC PLANT POWER GENERATION DATA AS A CYCLICAL RANDOM PROCESS
R. Sysak 171

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ СЕЗОННИХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ З КОМПЛЕКСНИМ ОБҐРУНТУВАННЯМ ЇХ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ
О. М. Попович, І. В. Головань 173

STUDY OF THE OPERATING MODES OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF SEASONAL THERMAL ACCUMULATORS WITH A COMPREHENSIVE JUSTIFICATION OF THEIR ECONOMIC FEASIBILITY.
O. Popovych, I. Golovan 173

РОЗРОБКА ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО РОБОТИ
С. Й. Мисак., С. П. Шаповал 174

DEVELOPMENT OF A HYBRID THERMAL PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR AND ANALYSIS OF ITS EFFICIENCY
S. Mysak, S. Shapoval 174

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ЗАЛУЧЕННЯ АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ ДО НАДАННЯ ПОСЛУГ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ
М. С. Черкашин, Т. П. Нечаєва 178

ANALYSIS OF MECHANISMS FOR ATTRACTING ACTIVE CONSUMERS TO THE PROVISION OF SERVICES IN THE ELECTRICITY MARKET OF UKRAINE
M. Cherkashyn, T. Nechaieva 178

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ
С. В. Созонов, І. В. Богачев, О. Л. Декуша, Ю. В. Куц 180

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF MEASUREMENT DATA ANALYSIS IN MAGNETOSTRICTIVE NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ENERGY FACILITIES
S. Sozonov, I. Bohachev, O. Dekusha, Y. Kuts 180

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ
М. А. Коваленко, О. О. Базаров, І. Я. Коваленко, Є. О. Тітов 182

MATHEMATICAL MODELING OF A CONTACTLESS HIGH-SPEED MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS
M. Kovalenko, O. Bazarov 182

MICROGRID – СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В НИЗЬКОВОЛЬТНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ
О. В. Окушко, І. П. Радько, В. А. Наливайко, В. В. Васюк, Д. С. Сорокін 184

MICROGRID SYSTEM AS A FACTOR FOR FORECASTING THE OPERATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN LOW-VOLTAGE ELECTRICITY CONSUMPTION SYSTEMS
O. Okushko, I. Radko, V. Nalyvayko, V. Vasyuk, D. Sorokin 184

ВИКОРИСТАННЯ СЕНСОРА TGS 821 У СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ВИТОКІВ ВОДНЮ
Є. О. Зайцев, Б. А. Кромпляс, А. С. Левицький, В. О.Березниченко, В. І. Бородій 186

UTILIZATION OF TGS 821 SENSOR IN HYDROGEN LEAK DETECTION SYSTEMS
Ie. Zaitsev, B. Kromplyas, A. Levytsky, V. Bereznychenko, V. Borodii 186

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ДИНАМІЧНУ СТІЙКІСТЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ
В. С. Карнаух 188

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTED GENERATION IMPACT ON ELECTRIC POWER SYSTEM DYNAMIC STABILITY

V. Karnaukh 188

КОАЛІЦІЙНІ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ
Д. Г. Дерев'янко, С. П. Денисюк, Г. С. Бєлоха, К. М. Гілевич 190

COALITION MODELS OF INTERACTION OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES IN LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEMS
D. H. Derevianko, S. P. Denysiuk, H. S. Bielokha, K. M. Hilevich 190

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЕКТУ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ
Є. І. Гоман, О. І. Шматок 193

IMPLEMENTATION OF AN ALTERNATIVE POWER SUPPLY SYSTEM USING PHOTOVOLTAIC PANELS
Y. Goman, O. Shmatok 193

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ NI-TI ПРИ РІЗНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ ПРУЖИНИ ДЛЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕПЛОВИХ ДВИГУНАХ
В. Я. Бунько 196

INVESTIGATION OF THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ELEMENTS BASED ON NITINOL ALLOY AT DIFFERENT DEFORMATION OF SPRING FOR THEIR USE IN HEAT ENGINES
V. Bunko 196

IMPLEMENTATION OF AN ALTERNATIVE POWER SUPPLY SYSTEM USING PHOTOVOLTAIC PANELS
Y. Goman, O. Shmatok 193

ПРОСТОРОВА ДОСТУПНІСТЬ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ
О. О. Савченко, Ю. С. Юркевич 199

SPATIAL ACCESSIBILITY OF DISTRICT HEATING SYSTEMS AND SPATIAL ANALYSIS OF RENEWABLE ENERGY SOURCES
O. O. Savchenko, Yu. S. Yurkevych 199

СЕКЦІЯ «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ»

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СУШИЛЬНІ УСТАНОВКИ НА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ
Ю. Ф. Снєжкін 201

ENERGY-EFFICIENT DRYING PLANTS POWERED BY RENEWABLE ENERGY SOURCES
Yu. Sniezhkin 201

ПРОЕКТ CTS: ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ CO_2 У ЧОРНОМУ МОРІ
Ю. В. Демчук, А. Дуду, Р. Беренблюм, І. В. Віршило, М. М. Курило 204

CTS PROJECT: ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS FOR CO2 TRANSPORT AND STORAGE IN THE BLACK SEA
Y. Demchuk, A. Dudu, R. Berenblyum, I. Virshylo, M. Kurylo 204

РОЗРАХУНОК СКОРОЧЕННЯ ПАРНИКОВИХ ВИКИДІВ В УМОВАХ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА
Б. С. Сорока, В. С. Кудрявцев, В. О. Згурський, Р. С. Карабчиєвська 206

CALCULATION OF REDUCTION OF THE GREENHOUSE EMISSIONS IN CONDITIONS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF FUEL USE
B. Soroka, V. Kudryavtsev, V. Zgurskyi, R. Karabchyievska 206

ENHANCING THE DRYING OF SEAWATER-DERIVED MAGNESIUM HYDROXIDE SLURRY USING NON-UNIFORM ELECTRIC FIELDS
A. Harford 210

ПІДВИЩЕННЯ ВИСУШУВАННЯ СУСПЕНЗІЇ ГІДРОКСИДУ МАГНІЮ, ОТРИМАНОЇ З МОРСЬКОЇ ВОДИ, ЗА ДОПОМОГОЮ НЕРІВНОМІРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ
А. Г. Харфорд 210

АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ
О. Л. Декуша, С. І. Ковтун, В. В. Цапенко, А .О. Рябіков 212

HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A BUILDING ENVELOPE AIRTIGHTNESS CONTROL SYSTEM
O. Dekusha, S. Kovtun, V. Tsapenko, A. Riabikov 212

ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR PASSIVE HOUSES USING CLAY-CONCRETE STRAW BLOCKS ACCORDING TO THE THERMAL CONDUCTIVITY CRITERION
L. Kyrnos, Henry Zaks 214

ВИВЧЕННЯ ТЕНДЕНЦІЙ ЗМІНИ СПОЖИВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕКОНОМІЦІ КРАЇНИ ЗАГАЛОМ І ЗОКРЕМА В ЕНЕРГОЄМНИХ СЕКЦІЯХ ЕКОНОМІКИ
В. В. Горський 219

STUDY OF TRENDS IN THERMAL ENERGY CONSUMPTION CHANGES IN THE NATIONAL ECONOMY AS A WHOLE AND IN ENERGY-INTENSIVE SECTORS OF THE ECONOMY
V. Horskyi 219

КЕРУВАННЯ МУЛЬТИМІКРОМЕРЕЖАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ
В.І.Будько, Д. Є. Коротченко, О. В. Козачук, М. О. Будько 221

MULTIMICROGRID CONTROLLING FOR ENERGY EFFICIENCY INCREASE
V. Budko, D. Korotchenko, O. Kozachuk, M. Budko 221

GEOSYN – GEOTHERMAL SYNERGY: ENHANCING INDUSTRIAL ENERGY EFFICIENCY THROUGH STEAM HIGH-TEMPERATURE HEAT PUMPS AND HEAT-POWERED COOLING SYSTEMS WITH OPERATIONAL FLEXIBILITY AND PUBLIC TRUST
Y. V. Demchuk, T. P. Popadynets 223

GEOSYN – ГЕОТЕРМАЛЬНА СИНЕРГІЯ: ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЗАВДЯКИ ВИКОРИСТАННЮ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРОВИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ТА СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ, ПОБУДОВАНИХ НА ТЕПЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ, З ГНУЧКІСТЮ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВИСОКОЮ ДОВІРОЮ СУСПІЛЬСТВА
Ю. В. Демчук, Т. П. Попадинець 223

ЗМЕНШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА
М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко. 225

REDUCTION OF OPERATING COSTS OF A AUTONOMOUS ELECTRIC GENERATOR
M. Kovalenko, I. Kovalenko 225

ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ УШКОДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГИ ВНАСЛІДОК УДАРІВ БЛИСКАВКИ
Є. О. Троценко, Я. А. Архипов 227

OVERVIEW OF THE PROBLEM OF DAMAGE TO SURGE ARRESTERS DUE TO LIGHTNING STRIKES
Y. Trotsenko, Y. Arkhypov 227

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАЗМОВИХ АКТУАТОРІВ У СКЛАДІ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЬОВИХ ВЕУ
Д. О. Редчиць, В. Ю. Скосар 229

USE OF PLASMA ACTUATORS AS PART OF HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINES
В. Ю. Скосар, Ю. В. Шкіль 229

ШВИДКІСНИЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ НА МАГНІТНІЙ ПОДУШЦІ
D. Redchyts, V. Skosar 232

HIGH-SPEED ELECTRIC TRANSPORT ON A MAGNETIC LEVITATION
V. Skosar, Yu. Shkil 232

КАВІТАЦІЙНА ОБРОБКА СТІЧНИХ ВОД
В. Ю. Скосар, Ю. О. Жулай, С. В. Комаров, С. В. Бурилов 235

CAVITATION WASTEWATER TREATMENT
V. Skosar, Yu. Zhulay, S. Komarov, S. Burylov 235

АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТВЕРДОПАЛИВНОГО КОТЛА
О. М. Суржик 238

ALGORITHM FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLID FUEL BOILER MAINTENANCE
O. Surzhyk 238

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТКИ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ, ЯКІ ВИКЛИКАНІ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ
В. М. Лисий 240

DETERMINATION OF THE PART OF ELECTRICITY LOSSES IN ELECTRICITY NETWORKS CAUSED BY RENEWABLE ENERGY SOURCES
V. Lysyi 240

ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЛУЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО НЕДОПАЛЕНОГО ВУГЛЕЦЮ З ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
В. П. Гончар, О. Б. Сезоненко, О. В. Назаренко, А. В. Ялтишев 242

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY FOR EXTRACTION OF RESIDUAL UNBURNED COAL FROM ASH DISPOSAL OF THERMAL POWER PLANTS
V. Gonchar, O. Sezonenko, O. Nazarenko, A. Yaltyshev 242

ІННОВАЦІЙНІ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ ПРИ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬ
А. С. Данішевський 246

INNOVATIVE THERMAL INSULATION MATERIALS FOR ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS FOR THERMAL MODERNISATION OF BUILDINGS
A. Danishevskyi 246

ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ВІТРА І СОНЦЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОТРЕБ ГРОМАД В ЕЛЕКТРИЧНІЙ ЕНЕРГІЇ
Д. Ю. Ткаченко, О. Г. Молибог 250

APPLICATION OF RENEWABLE WIND AND SOLAR ENERGY SOURCES TO PROVIDE COMMUNITIES' ELECTRICITY NEEDS
D. Tkachenko, O. Molybog 250

ФУНДАМЕНТАЛЬНА ТЕПЛОФІЗИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ БУДІВЕЛЬ В КОНТЕКСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
Б. І. Басок, Є. Т. Базєєв 253

FUNDAMENTAL THERMOPHYSICAL ENGINEERING OF BUILDINGS IN THE CONTEXT OF THE INFRASTRUCTURE RENEWAL OF UKRAINE
B. I. Basok, E. T. Bazeev 253

СЕКЦІЯ «СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА»

COMPUTER MODELING OF THE ENERGY FLOWS IN THE FLAT SOLAR PV/T PANEL
L. Knysh 257

ANALYSIS OF MECHANICAL STABILITY OF SILICON WAFERS FOR PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERTERS
Rayimjon Aliev, Dilnoza Khonbutayeva, Oybek Bozarov 258

OPTICAL PROPERTIES OF MONOFACIAL AND BIFACIAL SOLAR CELL USING SENTAURUS TCAD SOFTWARE
Aliev R.,Komilov M. , Aliyev S. 259

DEVELOPMENT OF PHOTOELECTRIC ENERGY DEVICES IN 3D FORMAT
N. Mirzaalimov, R. Aliev, X. Mamatojiyeva, M. Komilov, A. Mirzaalimov, M. Miryusupova 260

SOFTWARE FOR ENERGY MANAGEMENT SYSTEM DURING THE SELECTION OF A SOLAR COLLECTOR FOR HEATING SOCIAL AND ADMINISTRATIVE BUILDINGS
I. Segeda, V. Mamalyga 262

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ПІД ЧАС ВИБОРУ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ СОЦІАЛЬНО-АДМІНІСТРАТИВНИХ БУДІВЕЛЬ
І. В. Сегеда, М. М. Мамалига 262

ЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
Я. В. Гавриленко , В. О. Дерій 265

ENERGY COMPLEXES OF SOLAR POWER PLANTS AND ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS
Y. Havrylenko, V. Derii 265

GEOMETRIC OPTIMIZATION OF LAYERS IN INVERTED PEROVSKITE SOLAR CELLS USING TCAD SIMULATION
Irodakhon Gulomova, Rayimjon Aliyev 267

PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE USE OF CONCENTRATED ENERGY PLANTS WITH PHOTOCONVERTERS

X. Izzatullayev 268

STUDY OF THE EFFECT OF MECHANICAL PRESSURE ON THE OUTPUT PARAMETERS OF SILICON-BASED SOLAR PANELS
S. Bakirova, A. Kurbanov 269

OPTICAL PROPERTIES OF MONOFACIAL AND BIFACIAL SOLAR CELL USING SENTAURUS TCAD SOFTWARE
R. Aliev, M. Komilov, S. Aliyev 271

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF 100 KW SOLAR PHOTOELECTRIC SYSTEMS CONNECTED TO THE GRID AT THE FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING OF THE ANDIJAN STATE TECHNICAL INSTITUTE
N. Topvoldiyev, S. Aliyev 272

EFFICIENT PHOTOCELLS BASED ON SILICON WITH GE_XSI_{1-X}-SI HETEROSTRUCTURES
N. Zikrillaev, F. Urakova, M. Shoabdurakhimova, A. Sattorov 273

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ СОНЯЧНОЇ УСТАНОВКИ З ВІЛЬНИМ РЕЖИМОМ ТЕПЛООБІНУ ТА ЕЛЕКТРОСТИМУЛЯТОРОМ ЦИРКУЛЯЦІЇ ТЕПЛОНОСІЯ НА ВИХОДІ
В. М. Головко, В. Г. Володарський 275

ANALYSIS OF THE ENERGY BALANCE OF A SOLAR INSTALLATION WITH A FREE HEAT CYCLE MODE AND AN ELECTRIC CIRCULATION STIMULATOR HEAT TRANSFER AT THE OUTLET
V. Golovko, V. Volodarskyi. 275

ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У БАЛАНСІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ
П. Д. Лежнюк, Т. О. Лиса 277

IMPACT OF PHOTOELECTRIC MODULE DEGRADATION ON THE ELECTRICITY BALANCE OF LOCAL ELECTRICITY SYSTEMS
P. Lezhniuk, T. Lysa 277

ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДВОСТОРОННІХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ
В. С. Цих, А. М. Кульчак, А. В. Яворський 279

FEATURES OF INCREASING THE EFFICIENTY OF OPERATION OF BIFACIAL PHOTOVOLTAIC MODULES
V. Tsykh, A. Kulchak, A. Yavorskyi 279

INVESTIGATION OF AN IMPROVED SOLAR COLLECTOR IN COMSOL MULTIPHYSICS
R. Aliev, A. Eraliev, M. Nosirov, N. Mirzaalimov, V. Abduazimov 281

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ЗА КРИТЕРІЄМ РІЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
М. М. Кузнєцов 282

PHOTOVOLTAIC MODULE OPTIMISATION METHOD BASED ON ANNUAL ELECTRIC ENERGY YIELD
M. Kuznietsov 282

ВПЛИВ НА РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ РЕЖИМІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ І РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ
В. О. Комар, І. І. Смагло, В. В. Нетребський 284

INFLUENCE ON THE OPERATION OF POWER TRANSFORMERS OF THE MODES OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS AND DISTRIBUTION NETWORKS
V. Komar, I. Smaglo, V. Netrebsky 284

ВПЛИВ ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ НА РЕЗУЛЬТАТИ ПРОГНОЗУВАННЯ ГРАФІКІВ ЇХ ГЕНЕРУВАННЯ
В. О. Комар, Є. А. Тептя, О. М. Буряк 286

INFLUENCE ON THE OPERATION OF POWER TRANSFORMERS OF THE MODES OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS AND DISTRIBUTION NETWORKS
V. Komar, Ye. Teptya, O. Buryak 286

INFLUENCE OF TEXTURE FORMED ON THE SURFACE LAYER OF A SILICON-BASED SOLAR CELL ON THE PHOTOELECTRIC PARAMETERS
R. Aliev, S. Temirov , M. Nosirov, A. Mirzaalimov , M. Komilov 288

ТЕХНОЛОГІЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ У ВЕЛИКИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА
А. М. Клочков 289

THERMAL IMAGING-BASED DEFECT DETECTION TECHNOLOGY IN LARGE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE
A. Klochkov 289

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ СЕС
А. О. Павлов, О. М. Мороз, О. О. Мірошник 291

FEATURES EXPERIMENTAL STUDIES OF SURFACE TEMPERATURE CHANGES OF PHOTOVOLTAIC MODULES OF THE SPP
A. Pavlov, O. Moroz, O. Miroshnyk 291

PROBLEMS IN THE STRUCTURES AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF PEROVSKITE
Rustam Kabulov, Aleksandr Kutlimuratov, Mardon Khajiev, Ximmatali Joraev,
Latofat Shuhratova, Abduvoxid A.Ganiev, Sevinch Khajieva 293

STUDY OF THE PROPERTIES OF SILICON NANOCLUSTERS WITH GADOLINIUM (GD) ADMIXTURE
Khayrulla Zikrillaev, Abduvoxid A. Ganiev, Kutup S.Ayupov, S. Hasanbayeva, A. Karimov 295

STAND-ALONE SYSTEM ON RASPBERRY PLATFORM FOR MEASURING THE PARAMETERS OF
PHOTOVOLTAIC MODULES IN REAL CONDITIONS
A. Gaevskii, V. Ivanchuk 297

АВТОНОМНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ ПЛАТФОРМИ RASPBERRY ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ
ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ
О. Гаєвський, В. Іванчук 297

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC MODULES USING A SINGLE-LED
MODEL WITH VARIABLE PARAMETERS
A. Gaevskii, V. Ivanchuk 300

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВАХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОДНОДІОДНОЇ
МОДЕЛІ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ
О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук 300

СИНТЕТИЧНІ РЯДИ ДОБОВОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ
О. Гаєвський, Г. Гаєвська 303

SYNTHETIC DAILY INSOLATION SERIES FOR OPTIMIZATION PROBLEMS OF PV SYSTEMS
O. Gaevskii, H. Gaevska 303

КОМБІНОВАНІ СОНЯЧНІ МОДУЛІ – ТЕПЕРІШНЄ І МАЙБУТНЄ
В. І. Шевчук, В. О. Пундєв, І. О. Шейко 306

COMBINED SOLAR MODULES TODAY AND IN THE FUTURE
V. Shevchuk, V. Pundiev, I. Sheiko 306

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ НА ПРИКЛАДІ МІСТА ОДЕСИ
М. Д. Сильнягін 310

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF USING SOLAR POWER GENERATION ON THE EXAMPLE OF ODESA CITY
M. Sylniahin 310

ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОЛЕКТОРА ТА ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА
ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ
Д. В. Бондаренко, О. С. Дьяченко 313

USE OF A HYBRID PHOTOELECTRIC THERMAL COLLECTOR AND ELECTROLYZER
FOR HYDROGEN PRODUCTION
D. Bondarenko, O. Diachenko 313

ОХОЛОДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ПРОДУКТИВНОСТІ
М. М. Юрченко, С. В. Матях 317

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC MODULES BY AIR COOLING
M. Iurchenko, S. Matyakh 317

АНАЛІЗ ДІАГНОСТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ
М. О. Карпаш, Л. Я. Жовтуля, В. Б. Васечко, М. О. Шевчук, А. В. Яворський 319

ANALYSIS OF DIAGNOSTIC METHODS FOR DETERMINING THE DEGRADATION
OF PHOTOVOLTAIC MODULES
M. Karpash, L. Zhovtulya, V. Vasechko, M. Shevchuk, A. Yavorskyi 319

ФОТОЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК ZNO, МОДИФІКОВАНИХ БАРВНИКАМИ
В. О. Смілик, С. С. Фоманюк, Г. Я. Колбасов, І. А. Русецький, М. О. Данілов 321

PHOTOELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ZNO FILMS MODIFIED WITH DYES
V. Smilyk, S. Fomanyuk, G. Kolbasov, I. Rusetskyi, M. Danilov 321

PROSPECTS OF SOLAR ENERGY UTILIZATION IN UZBEKISTAN AND CENTRAL ASIA:
A PHYSICIST'S PERSPECTIVE
K. Ismaylov, Sh. Ollamberganov, T. Ismailov, D. Vakhobov 323

THE INFLUENCE OF GEOMETRIC FACTORS ON THE CHARACTERISTICS OF SILICON-BASED SOLAR CELLS
Botirjon Urmonov 325

DETERMINING THE I-V CHARACTERISTICS OF SILICON-BASED SOLAR CELLS OVER DIFFERENT
TEMPERATURE RANGES USING MODELING
R. Aliev, J. Ziyoitdinov, A. Mirzaalimov, M. Komilov, B. Rashidov 327

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ
Мілан Бєлік, О. О. Рубаненко, О. Є. Рубаненко 328

INCREASING THE EFFICIENCY OF USING PHOTOELECTRIC MODULES
Milan Belik, O. Rubanenko, O. Rubanenko 328

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
В МЕЖАХ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ
С. В. Матях 331

INCREASING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF SOLAR POWER PLANTS WITHIN
THE OVERALL ENERGY SYSTEM
S. Matiakh 331

СЕКЦІЯ «ВІТРОЕНЕРГЕТИКА»

ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОНОМНИХ ВІТРОВОДНЕВИХ КОМПЛЕКСІВ
С. О. Кудря, М. А. Ткаленко, К. В. Петренко, Л. В. Яценко 333

OPTIMIZATION OF AUTONOMOUS WIND-HYDROGEN COMPLEXES
S. Kudrya, M. Tkalenko, K. Petrenko, L. Yatsenko 333

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖІ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ДОЦІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ АВТОНОМНИХ
ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ АБО ВІТРОВОДНЕВИХ СИСТЕМ
В. П. Коханєвич М. О. Шихайлов, Н. В. Марченко, В. В. Коханєвич 335

DETERMINATION OF THE POWER LIMIT FOR THE EXPEDIENT USE OF AUTONOMOUS WIND POWER
OR WIND-HYDROGEN SYSTEMS
V. Kokhanievich, M. Shikhaylov, N. Marchenko, V. Kokhanievych 335

РОЗВИТОК ПРОМИСЛОВОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ СВІТОВОЇ ТЕНДЕНЦІЇ
ПОСТУПОВОГО ЗБІЛЬШЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК
В. С. Подгуренко, В. Є. Терехов, О. М. Гетманець 337

THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL WIND ENERGY IN UKRAINE IN THE CONTEXT OF THE GLOBAL TREND
OF PROGRESSIVE INCREASE IN THE RATED POWER OF WIND TURBINES
V. Podhurenko, V. Terekhov, O. Getmanets 337

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ЛЬВІВСЬКОМУ РАЙОНІ
ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ
М. Р. Лопушанська, Ю. І. Башинська, Ю. Т. Федак, В. Я. Сухар 339

PROSPECTS FOR WIND ENERGY DEVELOPMENT IN THE LVIV DISTRICT OF LVIV REGION
M. Lopushanska, Yu. Bashynska, Yu. Fedak, V. Sukhar 339

АНАЛІЗ ДОБОВИХ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ОБ'ЄДНАНОЇ
ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ
О. В. Згуровець, В. О. Дерій, Т. П. Нечаєва 341

ANALYSIS OF THE DAILY POWER OUTPUT PROFILES OF WIND POWER PLANTS IN UKRAINE'S
INTEGRATED POWER SYSTEM
O. Zgurovets, V. Derii, T. Nechaieva 341

MACHINE LEARNING IN RENEWABLE ENERGY: WIND FARM SITE SELECTION IN POLAND
A. Amsharuk 343

МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ З ІНТЕГРАЦІЄЮ В ГАЛУЗЕВІ СИМУЛЯТОРИ
Н. В. Курилко, Р. М. Федоришин 345

MODEL-BASED APPROACH FOR THE DEVELOPMENT OF WIND POWER PLANT CONTROL SYSTEMS WITH INTEGRATION INTO INDUSTRY SIMULATORS
N. Kurylko, R. Fedoryshyn 345

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОВИХ ТУРБІН З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛУ ВЕЙБУЛЛА ПРИ ОЦІНЮВАННІ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ
О. Г. Молибог, Д. Ю. Ткаченко 347

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF WIND TURBINES USING THE WEIBULL DISTRIBUTION PARAMETERS FOR ENERGY PRODUCTION ASSESSMENT
O. Molyboh, D. Tkachenko 347

СИСТЕМА КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ВІТРУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ВЕУ
О. Я. Кравченко 350

A SHORT-TERM WIND FORECASTING SYSTEM FOR OPTIMISING WIND POWER PLANTS
O. Kravchenko 350

ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ: ВІТРОПОТЕНЦІАЛ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ ДІЯЛЬНОСТІ
М. Р. Лопушанська, Л. В. Циганок, Ф. Ш. Абдуллаєв, Д. В. Завгородній 353

WIND ENERGY IN CHERKASY REGION: WIND POTENTIAL AND ENVIRONMENTAL RESTRICTIONS
M. Lopushanska, L. Tsyganok, F. Abdullaiev, D. Zavhorodnii 353

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: НА ПРИКЛАДІ АВСТРАЛІЇ
М. Р. Лопушанська, Л. В. Циганок, Д. В. Завгородній,
В. І. Данилишин, Н. В. Ревуцька, А. С. Доманський 355

PECULIARITIES OF ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT FOR WIND ENERGY PROJECTS: THE EXAMPLE OF AUSTRALIA
M. Lopushanska, L. Tsyganok, D. Zavhorodnii, V. Danylyshyn, N. Revutska, A. Domanskyy 355

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЕЛЕМЕНТІВ БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ
Д. Д. Овдій, В. М. Зварич, О. М. Глазкова, Л .Б. Остапчук 357

A FEATURES OF CONSTRUCTION OF ELEMENTS OF A MULTILEVEL SYSTEM VIBRATION DIAGNOSTICS OF WIND TURBINES
D. Ovdii, V. Zvaritch, O. Glazkova, L. Ostapchuk 357

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ
О. В. Кулєш, В. М. Зварич 359

SOME FEATURES OF USING NEURAL NETWORKS FOR VIBRATION DIAGNOSTICS OF WIND TURBINE
O. Kulesh, V. Zvaritch 359

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВОГО ВІТРОДВИГУНА В ПОТОЦІ В'ЯЗКОГО ГАЗУ
Ю. О. Крашаниця 361

MATHEMATICAL MODEL OF A VERTICAL-AXIAL WIND MOTOR IN A VISCOUS GAS FLOW
Yu. Krashanytsya 361

ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В ЛОПАТЯХ РОТОРА ДАР'Є
В. В. Коханєвич 363

DYNAMIC LOADS IN THE DARRIEUS ROTOR BLADES
V. Kokhanievich 363

ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА АВТОНОМНИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ
В. М. Головко, І. В. Косточка 365

РОБОТА ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ІМПУЛЬСНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ
В. В. Коханєвич 367

OPERATION OF A WIND POWER PLANT WITH A PULSE CONVERTER
V. Kokhanievich 367

ПРОЯВИ ЕФЕКТУ АВТООПТИМІЗАЦІЇ У ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ
З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ
Г. М Стрункін 369

MANIFESTATIONS OF THE AUTO-OPTIMIZATION EFFECT IN WIND POWER PLANTS
WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION
H. Strunkin 369

ЗАСТОСУВАННЯ КІНЕТИЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ
ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК
С. Т. Пазич 371

APPLICATION OF KINETIC ENERGY STORAGE TO IMPROVE THE OPERATION
OF WIND POWER INSTALLATION
S. Pazych 371

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВІДЦЕНТРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ РОТОРІВ
ВІТРОУСТАНОВОК МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ
М. О. Шихайлов, В. П. Коханєвич 373

ANALYSIS OF THE DESIGNS OF CENTRIFUGAL ANGULAR VELOCITY REGULATORS OF ROTORS
OF LOW-POWER WIND TURBINE
M. Shikhaylov, V. Kokhanievich 373

АПРОБАЦІЯ АДАПТИВНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО
ПОТЕНЦІАЛУ НА ПЛОЩАДЦІ ПРОЄКТНОЇ ВЕС
К. В. Петренко, Д. Ю. Ткаченко 375

TESTING OF AN ADAPTIVE METHOD FOR DETERMINING TECHNICAL WIND ENERGY POTENTIAL
AT THE PROJECT WIND POWER PLANT SITE
K. Petrenko, D. Tkachenko 375

СЕКЦІЯ «ГІДРО-ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА»

ДЕРЖАВНЕ ЗАМОВЛЕННЯ НА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ З
ОТРИМАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА
В. А. Жовтянський, В. П. Гончар, М. В. Остапчук, О. Б. Сезоненко 378

STATE ORDER FOR DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND MANUFACTURING OF EQUIPMENT FOR
HYDROGEN FUEL OBTAINING
V. Zhovtyansky, V. Gonchar, M. Ostapchuk, O. Sezonenko 378

АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕЛИКОМАСШТАБНОГО ВИРОБНИЦТВА НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО
ВОДНЮ НА ДІЮЧИХ БЛОКАХ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ
М. М. Уланов 380

ANALYSIS OF THE ECONOMIC INDICATORS OF LARGE-SCALE LOW-CARBON HYDROGEN PRODUCTION
AT OPERATING NUCLEAR POWER PLANT UNITS IN UKRAINE
M. Ulanov 380

ОГЛЯД ВИТРАТ НА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ ВИРОБНИЦТВО ВОДНЮ НА П’ЯТИ
ГЕОГРАФІЧНИХ ОСТРОВАХ ЄВРОПИ
І. В. Іванченко, О. О. Кармазін, К. В. Петренко 382

COST OVERVIEW OF ELECTROLYTIC HYDROGEN PRODUCTION IN FIVE EUROPEAN
GEOGRAPHICAL ISLANDS
I. Ivanchenko, O. Karmazin, K. Petrenko 382

ПРОБЛЕМАТИКА ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДНЮ
О. О. Мішин 386

PROBLEMS OF HYDROGEN STORAGE AND TRANSPORTATION
O. Mishyn 386

USE CASES FOR HYDROGEN IMPORTED INTO THE EU AND ITS CERTIFICATION
E. Chvanova, Dr. A. Sakhel 389

ОТРИМАННЯ БІОВОДНЮ ШЛЯХОМ ТЕМНОВОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ
А. І. Бондаренко 392

PRODUCTION OF BIOHYDROGEN BY TEMPORARY FERMATION
A. Bondarenko 392

ПІДЗЕМНІ СХОВИЩА ГАЗУ ЯК АКУМУЛЯТОР ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ
О. В. Стогній, С. А. Дякончук, Д. П. Дубров 394

ВОДЕНЬ У ВАШОМУ ДОМІ, МРІЯ ЧИ РЕАЛЬНІСТЬ
М. Бенменні 395

HYDROGEN IN YOUR HOME, DREAM OR REALITY
M. Benmenni 395

МЕМБРАННО-ЕЛЕКТРОДНИЙ БЛОК ДЛЯ ЕЛЕКТРОЛІЗНОГО ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ ТА КИСНЮ
Ю. К. Пірський, Ф. Д. Манілевич, Я. В. Колосовський, А. В. Куций 398

MEMBRANE-ELECTRODE ASSEMBLY FOR GENERATION OF HYDROGEN AND OXYGEN VIA ELECTROLYSIS
Yu. Pirskyy, F. Manilevich, Ya. Kolosovsky, A. Kutsyi 398

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЕВИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ПРОТОННООБМІННОЮ МЕМБРАНОЮ
В. О. Коровушкін, С. В. Бойченко, І. О. Шкільнюк 400

DETERMINATION OF THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HYDROGEN FUEL CELLS WITH A PROTON EXCHANGE MEMBRANE
V. Korovushkin, S. Boichenko, I. Shkilniuk 400

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ ZN-NI-CU ДЛЯ ЛУЖНОГО ЕЛЕКТРОЛІЗУ ВОДИ
А. О. Майзеліс 402

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MULTILAYER COATINGS BASED ON ZN-NI-CU ALLOYS FOR ALKALINE WATER ELECTROLYSIS
A. Maizelis 402

FEATURES OF USING HYDROGEN FOR CARBURETOR ENGINES
V. Dubovyk, K. Cherneha, M. Haiko, V. Kurganska, ... 403

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ДЛЯ КАРБЮРАТОРНИХ ДВИГУНІВ
В. Г. Дубовик, К. В. Чернега, М. Р. Гайко, В. І. Курганська 403

ZASTOSOWANIE WODOROWYCH OGNIW PALIWOWYCH DO EKOLOGICZNEGO ELEKTRYCZNEGO NAPĘDU JACHTU MOTOROWEGO
Aleksander Chróściak, Jacek Andrzejewski, Arkadiusz Zmuda 406

HYDROENERGY POTENTIAL AND OPPORTUNITIES OF USING IT IN CANALS AND RIVERS
A Boliev, O. Bozorov, E. Rabbimov 409

ФОРМУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ МАЛИХ ГЕС І ГАЕС ЗАСОБАМИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ
О. М. Попович, І. В. Головань 412

FORMATION OF EFFECTIVE MODES OF SMALL GES AND GAES BY MEANS OF COMPLEX STUDY OF THEIR ELECTROMECHANICAL SYSTEMS
O. Popovych, I. Golovan 412

DEVELOPMENT OF A NEW HYDRO-MICROTURBINE THROUGH MODELING AND DETERMINING ITS OUTPUT PARAMETERS
Tokhirjon Abdulazizov, Navruzbek Mirzaalimov, Murodjon Abduvohidov, Avazbek Mirzaalimov, Jamshidbek Qakhkhorov, Boburjon Rashidov 413

ELLIPTICAL HYDRAULIC TURBINE
Saidakhon Saidullayeva 415

MICROHYDROTURBINE TEST SET
Saidakhan Saydullaeva, Oybek Bozarov 417

ЕФЕКТИВНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ГРАВІТАЦІЙНОГО АКУМУЛЮВАННЯ В КОМПЛЕКСІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МАЛИХ ГЕС І ГАЕС
Л. К. Лістовщик, П. П. Мирутенко, О. М. Попович 419

EFFECTIVE APPLICATION OF GRAVITY STORAGE SYSTEMS IN THE COMPLEX OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT OF SMALL GES AND GAES
L. Listovshcyk, P. Myrutenko, O. Popovych 419

РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ
П. Ф. Васько, В. А. Рибальченко 421

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL WATER DESALINATION TECHNOLOGIES
P. Vasko, V. Rybalchenko 421

ПИТОМА ВАРТІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОПРІСНЕННЯ МОРСЬКОЇ ВОДИ
А. О. Бриль 424

SPECIFIC COST OF INDUSTRIAL SEAWATER DESALINATION TECHNOLOGIES
A. Bryl 424

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСТРЕМУМУ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ ЗА ЗМІННИХ ЗНАЧЕНЬ ШВИДКОСТІ ВІТРУ ТА ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ
П. Ф. Васько 426

DETERMINATION OF THE EXTREME POWER OF A WIND POWER PLANT AS AN ENERGY SOURCE FOR WATER DESALINATION UNDER VARIABLE WIND SPEED AND SPEED OF ROTATION VALUES
P. Vasko 426

АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОШУКУ ЕКСТРЕМУМУ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ
П. Ф. Васько, Б. А. Кромпляс 428

ALGORITHMICAL IMPLEMENTATION OF SEARCHING FOR THE POWER EXTREME OF A WIND POWER PLANT DURING OPERATION AS AN ENERGY SOURCE FOR WATER DESALINATION
P. Vasko, B. Kromplyas 428

СЕКЦІЯ «ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА»

ПЕРСПЕКТИВИ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В УКРАЇНІ
Г. С. Трипольська, П. Градзюк, А. О. Семенюк, Р. З. Подолець, О. А. Дячук 430

PROSPECTS FOR THE EXPANSION OF HEAT PUMPS IN UKRAINE
G. Trypolska, P. Gradziuk, A. Semeniuk, R. Podolets, O. Diachuk 430

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА СИСТЕМА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ ҐРУНТОВОЇ ВОДИ З ВОДОЗАБІРНОЇ СВЕРДЛОВИНИ
О. М. Недбайло, Б. І. Басок, І. К. Божко, В. О. Мартенюк 432

EXPERIMENTAL SYSTEM OF HEAT SUPPLY USING THE HEAT OF GROUNDWATER FROM A WATER INTAKE WELL
O. Nedbailo, B. Basok, I. Bozhko, V. Marteniuk 432

ЗАСТОСУВАННЯ ПОВІТРЯНО-ҐРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ У СИСТЕМІ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДИНКУ
О. М. Недбайло, Б. І. Басок, І. К. Божко, В. О. Мартенюк 434

APPLICATION OF AIR-GROUND HEAT EXCHANGERS IN THE GEOTHERMAL VENTILATION SYSTEM OF AN ENERGY-EFFICIENT BUILDING
O. Nedbailo, B. Basok, I. Bozhko, V. Marteniuk 434

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БІНАРНИХ ГЕОТЕС НА ПРИРОДНИХ РОБОЧИХ ТІЛАХ
Ю. П. Морозов, С. В. Дубовський 436

ENERGY EFFICIENCY OF BINARY GEOTPP ON NATURAL WORKING BODIES
Yu. Morozov, S. Dubovskyi 436

ОСВОЄННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАКАЧУВАННЯ ТА АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ В ПРОНИКНІ ПЛАСТИ ПОЛТАВСЬКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ
Ю. П. Морозов, О. В. Бачеріков, А. А. Барило, В. Г Олійніченко, І. В. Лобанова, А. В. Сорока, В. В. Севрюк 439

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF HEAT INJECTION AND ACCUMULATION IN THE PERMEABLE LAYERS OF THE POLTAVA AQUIFER
Yu. Morozov, O. Bacherikiv, A. Barylo, V. Olinichenko, I. Lobanova, A. Soroka, V. Sevruk 439

СПОСІБ ВИДОБУТКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ
Ю. П. Морозов, О. В. Бачеріков, В. Г. Олійніченко, І. В. Лобанова 442

THE METHOD OF PRODUCTION OF HEAT ENERGY USING THE GEOTHERMAL CIRCULATION SYSTEM
Yu. Morozov,O. Bacherikov, V. G. Olynichenko, I.V. Lobanova 442

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА НА ОСНОВІ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ
Б. І. Басок, М .П. Новіцька, О. В. Зур'ян 445

PREDICTION OF THE THERMAL STATE OF A VENTILATION GROUND HEAT EXCHANGER BASED ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK
B.Basok,M. Novitska, O. Zurian 445

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЇ ДВОСТАДІЙНОГО ВИДОБУВАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ
О. В. Зур'ян 447

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE TWO-STAGE GEOTHERMAL RESOURCE EXTRACTION TECHNOLOGY
O. Zurian 447

GEOTHERMAL ENERGY OF SPAIN AS A PART OF THE GREEN TRANSITION
Hanna Liventseva 449

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ЕКОНОМІКИ КРАЇНИ
Е. П. Пастушенко 453

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЛІКВІДОВАНИХ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ВИДОБУТКУ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ
А. А. Барило, О. В. Бачеріков, І. В. Лобанова 454

PROSPECTS OF USING LIQUIDATED OIL AND GAS WELLS FOR GEOTHERMAL RESOURCES PRODUCTION
A. Barylo, O. Bacherikov, I. Lobanova 454

ДЕРЖАВНА ПІДТРИМКА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. СВІТОВИЙ ДОСВІД
І. С. Соколовська, О. І. Тесленко 456

GOVERNMENT SUPPORT FOR THE IMPLEMENTATION OF HEAT PUMP TECHNOLOGIES IN HEATING SYSTEMS. WORLD EXPERIENCE
I. Sokolovska, O. Teslenko 456

СЕКЦІЯ «БІОЕНЕРГЕТИКА»

POTENTIAL OF BIOMETHANE PRODUCTION AND USE IN AGRICULTURE
Kęstutis Navickas, Kęstutis Venslauskas 458

ПЕРЕОБЛАДАННЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК В ЄС ЯК ЗАСІБ ПРИСКОРЕННЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ РЕЗИЛЬЄНТНОСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОГО КОНТИНЕНТУ
О. В. Савицький, О. А. Дячук 459

CONVERSION OF BIOGAS PLANTS IN THE EU AS A MEASURE TO ACCELERATE DECARBONIZATION AND INCREASE THE RESILIENCE OF THE EUROPEAN CONTINENT
O. Savytskyi, O. Dyachuk 459

КОМБІНОВАНИЙ ГЕНЕРАТОР ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
Ю. М. Лобунець, В. П. Клюс, Г. О. Четверик 462

COMBINED HEAT AND POWER GENERATOR
Y. Lobunets, V. Klyus, H. Chetveryk 462

АДАПТОВАНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУР ПЛАВКОСТІ ЗОЛИ ТВЕРДИХ БІОПАЛИВ
М. М. Жовмір 463

ADAPTED METHOD FOR DETERMINING THE FUSIBILITY TEMPERATURES OF SOLID BIOFUELS ASH
M. Zhovmir 463

ДОСЛІДЖЕННЯ КАРБОНІЗАЦІЇ ТА СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОЇ БІОМАСИ
О. М. Дудник, І. С. Соколовська 465

RESEARCH OF CARBONAZATION AND COMBUSTION OF SOLID BIOMASS
O. Dudnyk, I. Sokolovska 465

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВУЗЛА ПОДАЧІ ПОВІТРЯ КАМЕРИ ГАЗИФІКАЦІЇ НА РУХ ПОТОКІВ ПОВІТРЯ В ГАЗОГЕНЕРАТОРІ
Г. А. Голуб, В. П. Клюс, І. С. Омаров 467

INFLUENCE OF AIR-SUPPLY UNIT PARAMETERS OF THE GASIFYING CHAMBER ON THE DISTRIBUTION OF AIR FLOWS IN A GAS PRODUCER
G. Golub, V. Klyus, I. Omarov 467

ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНА ПЕРЕРОБКА ЛУШПИННЯ СОНЯШНИКУ
В. П. Клюс, З. В. Маслюкова, Є. Г. Новицька 469

ENERGY-TECHNOLOGY PROCESSING OF SUNFLOWER HUSKSP
V. Klius, Z. Masliukova, Y. Novytska 469

ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ КОМПОЗИТНОЇ СИРОВИНИ З МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ, ТОРФУ ТА ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З БІОМАСОЮ
Ж. О. Петрова, В. М. Пазюк, Ю. П. Новікова, А. В. Бадеха 471

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DRYING MODES OF COMPOSITE RAW MATERIALS BASED ON OF SOLID PEAT RESIDUES
Zh. Petrova, V. Paziuk, Yu. Novikova, A. Badekha 471

ДЕЯКІ АСПЕКТИ СПІЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ БІОМАСИ Й ВУГІЛЛЯ
О. С. Матвійчук, Н. І. Соколовська 473

SOME ASPECTS OF CO-COMBUSTION OF BIOMASS AND COAL
O. Matviychuk, N. Sokolovska 473

ПАЛИВНІ ХАРАКТРИСТИКИ БІОМАСИ ОБЛІПИХИ КРУШИНОВИДНОЇ, ВИРОЩЕНОЇ НА ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНИХ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТАХ
Л. З. Шевчик-Костюк, О. І. Романюк, І. В. Ощаповський 475

FUEL PROPERTIES OF BIOMASS OF HYPPOPHAE RHAMNOIDES PLANTS, GROWN ON TECHNOLOGICALLY DISTURBED OIL-POLLUTED SOILS
L. Shevchyk-Kostiuk, O. Romaniuk, I. Oshchapovsky 475

ШТУЧНЕ КОМПОЗИТНЕ ПАЛИВО З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ТОРФУ
Т. В. Корінчевська, В. А. Михайлик 477

ARTIFICIAL COMPOSITE FUEL FROM MUNICIPAL SOLID WASTE AND PEAT
T. Korinchevska, V. Mykhailyk 477

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА RDF З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ (ТПВ)
В. М. Чмель, І. П. Новікова 479

USE OF ARTIFCIAL SOLIDFUEL RDF FROM DOMESTIC SOLID WASTE (MSW)
V. Chmel, I. Novikova 479

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРІВ ТУРБІН
В. Ряполов, Т. Полякова 482

IMPROVEMENT OF THE TURBINE CONDENSER COOLING SYSTEM
V. Riapolov, T. Poliakova 483

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ЗАВАНТАЖЕННЯ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА
О. А. Яременко, Г. А. Голуб 484

METHOD FOR DETERMINING OF THE BIOGAS REACTOR LOADING PERIOD
O. Yremenko, G. Golub 484

ВИМОГИ ДО ЧИСТОТИ БІОМЕТАНУ
П. А. Голубєв, А. В. Слюзар 486

REQUIREMENTS FOR THE QUALITY OF BIOMETHANE
P. Holubiev, A. Slyuzar 486

МЕТОД ХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ СОНЯШНИКОВОГО ЛУШПИННЯ ПЕРОКСИДОМ ВОДНЮ В ЛУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВИХОДУ БІОГАЗУ
О. О. Костюк, І. В. Дем’яненко 487

METHOD OF CHEMICAL TREATMENT OF SUNFLOWER HUSK WITH HYDROGEN PEROXIDE IN ALKALINE ENVIRONMENT TO INCREASE BIOGAS YIELD
O. Kostiuk, I. Demianenko 487

ПОРІВНЯННЯ СОРГО ТА КУКУРУДЗИ ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ
В. О. Самарін, Т. С. Іванова, С. П. Циганков. 489

COMPARISON OF SORGHUM AND CORN AS FEEDSTOCKS FOR BIOETHANOL PRODUCTION
V. Samarin, T. Ivanova, S. Tsygankov. 489

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ
В. Ю. Скосар, Н. В. Бурилова, С. В. Комаров, С. В. Бурилов 491

SOME PROBLEMS OF USING BIOCOAL
V. Skosar, N. Burylova, S. Komarov, S. Burylov 491

СЕКЦІЯ «ОСВІТНЯ ДІЯЛЬНІСТЬ»

КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ ТА ЇХ ВИВЧЕННЯ У ВИЩІЙ ШКОЛІ: МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ
В. В. Іванців, В. В. Федонюк, М. А. Федонюк 494

CLIMATE CHANGE AND ITS STUDY IN HIGHER EDUCATION: METHODOLOGICAL ASPECTS
V. Ivantsiv, V. Fedonyuk, M. Fedonyuk 494

ОБҐРУНТУВАННЯ ПОТРЕБИ ТА ШЛЯХИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ НАДАННЯ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ ДЛЯ ВОДНЕВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ
Н.-А. Ю. Сорока, М. О. Карпаш, Л. Я. Жовтуля, М. М. Косьмій 496

JUSTIFICATION OF THE NEED AND WAYS TO BUILD A SYSTEM OF EDUCATIONAL SERVICES FOR THE HYDROGEN INDUSTRY OF UKRAINE
N.-A. Soroka, M. Karpash, L. Zhovtulia, M. Kosmii 496

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ БАКАЛАВРСЬКОЇ ОСВІТНЬОЇ ПРОГРАМИ У СФЕРІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ
В. С. Цих, А. В. Яворський, М. О. Карпаш 498

FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF THE BACHELOR'S DEGREE PROGRAM IN RENEWABLE ENERGY
V. Tsykh, A. Yavorskyi, M. Karpash 498

ЦИФРОВІЗАЦІЯ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ: СУЧАСНІ ТРЕНДИ ТА ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ
В. І. Данилишин, М. Р. Лопушанська, О. Б. Роїк 500

DIGITALIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS: CURRENT TRENDS AND A LOOK INTO THE FUTURE
V. Danylyshyn, M. Lopushanska, O. Roik 500

IMPROVEMENT OF METHODOLOGY FOR ORGANIZING STUDENTS' INDEPENDENT WORK IN THE COURSE OF "ALTERNATIVE ENERGY SOURCES"
Abdukahharova Munojat Abdulhafiz qizi 502

IMPROVING STUDENTS' INFORMATION AND COMMUNICATION COMPETENCES IN RENEWABLE ENERGY EDUCATION
Kakhramonova Shokhida 503

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RENEWABLE ENERGY SOURCES EDUCATION IN THE BACHELOR'S PROGRAMS OF THE UNIVERSITY OF TURIN (ITALY) AND ANDIJAN STATE UNIVERSITY (UZBEKISTAN)
N. Abbosova 505

РОЛЬ ПРОФЕСІЙНИХ СТАНДАРТІВ У ФОРМУВАННІ ФАХОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ЕНЕРГОМЕНЕДЖЕРІВ КОМПАНІЙ
О. В. Бориченко, А. В. Чернявський, К. А. Чернявський 508

THE ROLE OF PROFESSIONAL STANDARDS IN SHAPING THE PROFESSIONAL COMPETENCIES OF COMPANY ENERGY MANAGERS
O. Borychenko, A. Cherniavskyi, K. Cherniavskyi 508

СЕКЦІЯ «МОЛОДІ ВЧЕНІ»

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СОНЯЧНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ: СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРЕСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ
С. В. Яцела, Н. М. Науменко 510

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN SOLAR ENERGY: CURRENT TRENDS AND DEVELOPMENT PROSPECTS
S. Yatsela, N. Naumenko 510

ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ: ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГОКОМПЛЕКСІВ
Д. Є. Борисович 512

ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ
М. О. Заїка 514

АВТОНОМНЕ ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОФОРА ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЕРТАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ З СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ
І. О. Коверсун, О. В. Козленко, С. М. Тернавська 515

AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF THE TRAFFIC LIGHT WITH A ROTATING MECHANISM WITH SOLAR PANELS
I. Koversun, O. Kozlenko, S. Ternavska 515

ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ В НАВЧАЛЬНОМУ КОРПУСІ № 22 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВОГО ІНСТИТУТУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО
Д. Брюховських 517

IMPLEMENTATION OF ENERGY MANAGEMENT IN THE EDUCATIONAL BUILDING № 22 OF THE EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC INSTITUTE OF ENERGY SAVING AND ENERGY MANAGEMENT OF IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE
D. Briukhovskykh 517

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НИЗЬКОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТІЛКИ ДЛЯ ВЗУТТЯ
Є. В. Войтович, О. Ю. Мєшков 519

CREATION OF CONSTRUCTION OF LOW POWER ENERGY SOURCE BASED ON THE PIEZOELECTRIC INSOLE FOR SHOES
E. Voitovych, O. Mieshkov 519

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ
К. І. Іванюра, О. І. Деканенко 521

INNOVATIVE APPROACHES TO IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN THE RESIDENTIAL SECTOR OF DONETSK REGION
K. Ivaniura, O. Dekanenko 521

КОНДИЦІОНЕР НА ЕЛЕМЕНТАХ ПЕЛЬТЬЄ
В. Ю. Кермач, А. А. Леоненко 523

AIR CONDITIONER BASED ON PELTIER ELEMENTS
V. Kermach, A. Leonenko 523

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УКРИТТІВ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ АСПЕКТІВ
В. О. Козова, О. В. Шандригіна 525

OPTIMIZATION OF BUILDING MATERIALS FOR SHELTERS CONSIDERING ENVIRONMENTAL AND ENERGY EFFICIENCY ASPECTS
V. Kozova, O. Shandrygina 525

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ В ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ (НА ПРИКЛАДІ СМІЛЯНСЬКОЇ ТЕЦ)
М. В. Косенко, Л. М. Онученко 527

ANALYSIS OF WOOD BIOMASS USAGE IN THERMAL POWER PLANTS (CASE STUDY OF SMILA TPP)
M. Kosenko, L. Onuchenko 527

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА КОМФОРТ SMART SUN BENCH
О. В. Шандригіна, С. В. Мамаєва 529

ENERGY EFFICIENCY AND COMFORT OF SMART SUN BENCH
O. Shandryhina, S. Mamaieva 529

ЕНЕРГЕТИЧНІ ІННОВАЦІЇ: МАЙБУТНЄ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ
О. В. Мєщєрякова 531

ENERGY INNOVATIONS: THE FUTURE OF RENEWABLE ENERGY AND HYDROGEN TECHNOLOGIES
O. Mieshchieriakova 531

«МІНІПІЧ» – АВТОНОМНИЙ ГЕНЕРАТОР ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ
М. С. Пасько, О. А. Коваленко, О. В. Козленко 533

«MINIFURNACE» – AUTONOMOUS ELECTRICITY GENERATOR
M. Pasko, O. Kovalenko, O. Kozlenko 533

ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ НА ЛОКАЛЬНОМУ РІВНІ ТА ГЕОГРАФІЯ НЕСАНКЦІОНОВАНИХ СМІТТЄЗВАЛИЩ
А. С. Піддубний 535

WASTE DISPOSAL PROBLEMS AT THE LOCAL LEVEL AND GEOGRAPHY OF UNAUTHORIZED LANDFILLS
A. Piddubnyi 535

ПОЛОХІВСЬКЕ РОДОВИЩЕ ЛІТІЄВИХ РУД ЯК ПЕРСПЕКТИВНЕ ДЖЕРЕЛО СИРОВИНИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
І. Г. Плахін, Г. М. Башлик 537

POLOKHIVSKE LITHIUM ORE DEPOSIT AS A PROMISING SOURCE OF RAW MATERIALS FOR THE DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES
I. Plakhin, H. Bashlyk 537

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ НЕЗАДІЯНИХ ЗЕМЕЛЬ У КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ ДЛЯ НАСАДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР
В. М. Савенков, О. С. Назаренко 539

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF UNUSED LANDS IN KYIV REGION FOR PLANTING ENERGY CROPS
V. Savenkov, O. Nazarenko 539

ДОСЛІДЖЕННЯ АКУМУЛЯЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ
М. А. Синявський, В. О. Єрмоленко 541

RESEARCH ON SOLAR ENERGY ACCUMULATION
M. Synyavsky, V. Ermolenko 541

СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ
А. Г. Ясінський 543

CREATION OF WIND POWER PLANT MODEL AND RESEARCH OF ITS OPERATION PARAMETERS
A. Yasinskyi 543

СТВОРЕННЯ ПОРТАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ АКУМУЛЯТОРІВ І СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ
М. С. Хижняк 545

CREATION OF A PORTABLE ENERGY SOURCE BASED ON BATTERIES AND SUPERCAPACITORS AND RESEARCH OF ITS OPERATING PARAMETERS
M. Khyzhniak 545

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО СПОСОБУ БІОКОНВЕРСІЇ ВІДХОДІВ МОЛОЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ З ОТРИМАННЯМ БІОГАЗУ
М. Д. Івлева, С. М. Гармаш 547

RESEARCH ON AN ENVIRONMENTALLY SAFE METHOD OF BIOCONVERSION OF DAIRY INDUSTRY WASTE TO PRODUCE BIOGAS
M. Ivleva, S. Garmash 547

ДОДАТКОВІ ТЕЗИ

АНАЛІЗ КАПІТАЛЬНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІВ ТА СТРАТЕГІЇ ЗНИЖЕННЯ СОБІВАРТОСТІ
Б.В. Максименко 550

CAPITAL COST ANALYSIS OF ELECTROLYZERS AND COST REDUCTION STRATEGIES
B. Maksymenko 550

ПОРІВНЯННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ, СОНЯЧНИХ ТА ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ
О. В. Лисак 553

COMPARISON OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF GEOTHERMAL, SOLAR AND WIND POWER PLANTS
O. Lysak 553

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ДЖЕРЕЛА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ
О. В. Лисак 557

SELECTION OF A RENEWABLE ENERGY SOURCE FOR THE RECONSTRUCTION OF THE HEATING SYSTEM
O. Lysak 557

ФУНДАМЕНТАЛЬНА ТЕПЛОФІЗИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ БУДІВЕЛЬ В КОНТЕКСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ
Б. І. Басок, Є. Т. Базєєв 560

FUNDAMENTAL THERMOPHYSICAL ENGINEERING OF BUILDINGS IN THE CONTEXT OF THE INFRASTRUCTURE RENEWAL OF UKRAINE
B. Basok, E. Bazeev 560

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІЛЬКОСТІ ТА ЯКОСТІ ВИХІДНИХ ПРОДУКТІВ В РЕЗУЛЬТАТІ ПЕРЕРОБКИ ГУМОВИХ ВІДХОДІВ РІЗНИХ ТИПІВ МЕТОДОМ ПІРОЛІЗУ
К. В. Фута, С. В. Бойченко 563

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTITY AND QUALITY OF OUTPUT PRODUCTS FROM PYROLYSIS OF DIFFERENT TYPES OF RUBBER WASTE
K. Futa, S. Boichenko 563

СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД З ПОЛІГЕНЕРАЦІЄЮ
В. В. Каплун 565

ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF TERRITORIAL COMMUNITIES WITH POLYGENERATION
V. Kaplun 565

ПОРТАТИВНИЙ ЗАРЯДНИЙ КОМПЛЕКС
Д. О. Піжик 568

РОЗРОБКА АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ
І. Ю. Папаїка 569

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАГУВАННЯ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОМЕРЕЖІ НА ЧАСТОТУ В ГІБРИДНІЙ ЕНЕРГОМЕРЕЖІ З ВДЕ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ УЗЕ
С. В. Хомутов 571

MODELING OF THE ISLAND MODE OF A HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEM
S. Khomutov 571

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ МУНІЦИПАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ В МІСТІ ЗАПОРІЖЖЯ
Карпенко А. В. 574

ANALYSIS OF TECHNICAL SUPPORT OF THE ENERGY MONITORING SYSTEM OF MUNICIPAL FACILITIES IN THE CITY OF ZAPORIZHYA
Karpenko A. 574

УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ЗАЛУЧЕННЯ АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ
А. М. Пустовий, Ю. А. Веремійчук 580

MANAGEMENT OF HYBRID POWER SUPPLY SYSTEMS BASED ON THE INVOLVEMENT OF ACTIVE CONSUMERS
A. Pustovyi, Y. Veremiichuk 580

ВИКОРИСТАННЯ ПОРТАТИВНОЇ ТРЕКЕРНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В УМОВАХ МІСТА
Я. Д. Онищенко, Ю. А. Веремійчук, С. М. Гончарук 582

USE OF A PORTABLE TRACKER SOLAR POWER PLANT IN URBAN ENVIRONMENTS
Y. Onyshchenko, Y. Veremiichuk, M. Goncharuk 582

ГЕОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ПРОЄКТІВ В УКРАЇНІ
А. М. Намонюк 584

GEOLOGICAL RISKS IN GEOTHERMAL PROJECTS IN UKRAINE
A. M. Namoniuk 584

ШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

Від організаторів конференції, співробітників Інституту відновлюваної енергетики НАН України та від себе особисто вітаю всіх учасників XXVI Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті".

Незважаючи на складний для нашої країни та всього світу час, ми продовжуємо активну співпрацю у напрямку інтенсифікації наукових досліджень. Хоча збройна агресія рф проти України негативно вплинула на весь сектор відновлюваної енергетики, але нові виклики дали поштовх до знаходження та прийняття нових рішень та інструментів підтримки її подальшого розвитку із застосуванням інноваційних відновлюваних технологій отримання енергії.

Для стабільного енергозабезпечення вирішуються завдання, до яких належать розв'язання науково-технічних і технологічних проблем освоєння енергії відновлюваних джерел; підвищення ККД енергетичного обладнання та комплексне його використання, зниження вартості виробленої енергії, створення інноваційних моделей диспетчеризації, надійне прогнозування виробництва електричної та теплової енергії й запровадження технологій їх акумулювання, зокрема на основі водню.

Дякую всім за співробітництво та можливість ознайомлення з результатами наукових праць, що дозволяє інтенсифікувати проведення наукових досліджень. Особлива подяка за підтримку керівництву НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», польським колегам та представникам Української Водневої Ради.

Бажаю учасникам конференції результативної роботи з об'єднання вітчизняного і міжнародного досвіду, успіхів у подальшій науковій діяльності для вирішення поставлених задач, а також впровадження в життя наукових здобутків для зміцнення позицій відновлюваної енергетики України.

Слава Україні!

Директор Інституту
відновлюваної енергетики НАН України,
д.т.н., чл.-кор. НАНУ, професор Степан КУДРЯ

ШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

Щиро вітаю з початком роботи XXVI-ї Міжнародної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті".

Розвиток відновлюваної енергетики є одним із найбільш перспективних напрямів як світової, так і вітчизняної енергетики. Для поліпшення ситуації в енергетичній галузі нашої держави прийнято курс на модернізацію, у тому числі за рахунок широкомасштабного впровадження технологій відновлюваної енергетики та заходів енергоефективності у всіх галузях господарювання.

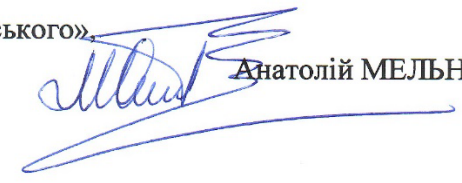
Багато освітян та науковців КПІ ім. Ігоря Сікорського приймають активну участь у розробці та впровадженні нових інноваційних енергетичних проєктів в тому числі направлених на більш широке застосування відновлюваних джерел енергії. На базі трьох підрозділів університету та бібліотеки ім. Г. І. Денисенка вже реалізовані автономні фотоелектричні системи гарантованого електроживлення, які окрім задоволення виробничих потреб використовуються також і в навчальному процесі. Символічно, що саме під керівництвом Григорія Івановича ще у 80-х роках минулого століття було створено одну із перших на той час систем комбінованого використання відновлюваних джерел енергії на базі науково-дослідного полігону «Десна».

В КПІ ім. Ігоря Сікорського успішно функціонує кафедра відновлюваних джерел енергії, яка вже більше 20 років готує кваліфікованих фахівців за всіма перспективними напрямами відновлюваної енергетики. Наші випускники працюють як у державних, так і приватних організаціях, пов'язаних із використанням енергії відновлюваних джерел, займаються науковою та освітньою діяльністю. Викладачі та науковці кафедри у колаборації з українськими та закордонними колегами співрацюють в питаннях удосконаленням технологій та проєктів відновлюваної і зеленої водневої енергетики, бурхливий розвиток яких спостерігається зараз у світі і вважається перспективою заміни викопного органічного палива.

Запрошую до співпраці з об'єднання вітчизняного і міжнародного досвіду, що сприятиме підвищенню рівня наукових досліджень, а їх впровадження – досягненню екологічної безпеки та енергетичної незалежності нашої держави. Бажаю результативної роботи з обміну результатами наукових досліджень і досвіду практичного впровадження, науковими ідеями та творчими планами.

Слава Україні та нашим героям!

Ректор «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
к.ф.н., професор Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО



Учасникам XXVI Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті"

Вітаю учасників та організаторів XXVI-ої Міжнародної науково-практичної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті".

Як і весь народ України, науковці Національної академії наук України сьогодні живуть реаліями воєнного часу, забезпечуючи енергетичну незалежність нашої країни, що накладає ще більшу відповідальність за результати нашої праці.

Незважаючи на складні часи, Національна академія наук України, зокрема установи Відділення енергетики та енергетичних технологій НАН України, продовжують всебічно сприяти розвитку відновлюваної енергетики.

Для забезпечення сталого розвитку України вкрай важливим є постійний ґрунтовний науковий супровід, оскільки повоєнне відновлення енергетичної галузі потребує нових підходів, що базуються на удосконаленні та впровадженні інноваційних енергетичних технологій з широким використанням відновлюваних джерел енергії та систем акумулювання енергії.

Важливим питанням, що вимагає особливої уваги, є взаємозв'язок розвитку відновлюваної та традиційної енергетики, який визначатиме рівень безпеки і надійності роботи енергетичної системи України.

Подальший розвиток відновлюваної енергетики України – це питання не лише власної енергетичної та екологічної безпеки, а й спосіб долучитися до глобальних зусиль всього наукового співтовариства і повніше інтегруватися до світової спільноти.

Впевнений, що сьогоднішня конференція сприятиме обміну досвідом, результатами досліджень, науковими ідеями та творчими планами між учасниками конференції, що підвищить рівень наукових досліджень та практичних напрацювань.

Від усього серця бажаю конференції плідної роботи, а всім її учасникам доброго здоров'я, творчої наснаги, терпіння й наполегливості у подоланні нових викликів, що постають перед нашою країною та світовою спільнотою.

Академік-секретар Відділення
енергетики та енергетичних
технологій НАН України
академік НАН України Олександр КИРИЛЕНКО

ШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

Вітаю учасників XXVI Міжнародної конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті". Дякую організаторам та колегам за продовження багаторічної співпраці з підготовки учнівської молоді до наукової діяльності у галузі відновлюваної та водневої енергетики.

На сьогодні розвиток відновлюваної енергетики є надзвичайно важливим не тільки для поліпшення стану вітчизняної енергетики та екологічної ситуації в країні, але й для її збереження від ударів ворога шляхом розосередження енергетичних об'єктів із використанням місцевих екологічно чистих відновлюваних джерел енергії.

Активна діяльність із залучення учнівської молоді до наукової і науково-технічної діяльності у галузі відновлюваної енергетики проводиться Малою академією наук України спільно із Інститутом відновлюваної енергетики НАН України та кафедрою відновлюваних джерел енергії НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» вже майже десятиліття. У процесі проведення спільних заходів, участь у яких приймають школярі Малої академії наук України та керівники їхніх наукових проєктів із різних областей України, представляються результати наукових досліджень з проблем і перспектив використання енергії відновлюваних джерел, а також можливостей реалізації заходів енергозбереження та енергоефективності.

Участь представників Малої академії наук України у роботі конференції надає можливість подальшої професійної реалізації юних особистостей та підготовки цілої плеяди молодих фахівців з різних напрямів освоєння енергії відновлюваних джерел. Наша спільна фахова та виховна робота сприятиме не тільки досягненню високого рівня знань, умінь та навичок, але й стимулюватиме розвиток їх творчого потенціалу, що, зрештою, дозволить молоді стати гідними фахівцями у галузі відновлюваної енергетики та енергоефективності.

Бажаю вам і вашим рідним міцного здоров'я та терпіння, наполегливості та успіхів у професійній діяльності на благо нашої країни та світової спільноти.

Слава Україні!

Президент
Малої академії наук України,
академік НАН України Станіслав ДОВГИЙ

XXVI міжнародна науково-практична конференція
“Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті”
21–23 травня 2025 року

Вітальне слово

Шановні учасники конференції,

XXVI міжнародна науково-практична конференція “Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті” є важливим майданчиком для обміну знаннями та ідеями між науковцями, представниками державних структур, навчальних закладів, бізнесу та інвесторами. Ми всі об'єднані спільною метою – розвитком сталих і інноваційних енергетичних технологій, що здатні забезпечити енергетичну безпеку та стійкий розвиток наших країн.

Тематика конференції охоплює широкий спектр ключових напрямків у галузі відновлювальної енергетики, зокрема енергоефективність, вітро- та сонячну енергетику, біомасу, гідро- та геотермальну енергетику, а також важливу роль водневої енергетики. І саме в цьому контексті, водневі технології мають величезний потенціал для трансформації глобальної енергетики.

Як Віцепрезидент Української водневої ради, я переконаний, що Україна має всі можливості стати одним з лідерів у розвитку водневої енергетики в Європі. Це надзвичайно важливий аспект у контексті нашого прагнення до енергетичної незалежності, зниження викидів парникових газів і забезпечення стійкого енергетичного майбутнього. Водень як енергоносій відкриває нові можливості для збереження навколишнього середовища та створення нових робочих місць.

Особливу увагу хочу звернути на важливість співпраці між наукою, бізнесом та державними структурами для досягнення спільних цілей. Я впевнений, що лише через взаємодію, інновації та інвестиції ми зможемо побудувати ефективну та екологічно чисту енергетичну інфраструктуру.

Вітаю всіх учасників конференції і бажаю плідних дискусій, нових ідей та успішних результатів у розвитку відновлюваних джерел енергії та водневої енергетики!

З повагою,

Віцепрезидент ГС «Енергетична асоціація «УКРАЇНСЬКА ВОДНЕВА РАДА» **Олександр РЄПКІН**

ВЕЛЬМИШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ДОРОГІ КОЛЕГИ!

Від імені колективу Факультету електроенерготехніки та автоматики дозвольте щиро привітати Вас з початком роботи XXVI Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті».

Сучасні виклики, які передусім пов'язані з енергетичною безпекою, а також зміною клімату й сталим розвитком, можуть бути подолані за допомогою впровадження нових інноваційних енергетичних технологій. Саме завдяки вашій професійній діяльності, науковим дослідженням і практичним досягненням формується нова основа для побудови безпечного та енергоефективного майбутнього на благо нових поколінь.

Наші співробітники є постійними учасниками конференції від самого початку її заснування. І незважаючи на всі випробування і реалії, в яких ми живемо, мені дуже приємно, що цей захід продовжує започатковані традиції зустрічей та обговорення важливих питань розвитку відновлюваної енергетики як в Україні, так і світі. Цей майданчик є також важливим інструментом нових можливостей колаборації та співпраці як з українськими так і закордонними колегами.

Також окремо хочу привітати наших молодих учасників, а саме представників МАН України, студентів та аспірантів, що представили результати своїх досліджень. Дуже приємно, що наша спільна ініціатива, ІВЕ НАНУ та КПІ ім. Ігоря Сікорського, яка була започаткована ще 2017 року, продовжується з кожною наступною конференцією, в межах секції «Молоді вчені».

Шановні колеги, розвиток відновлюваної енергетики створює нові робочі місця у сферах проєктування, будівництва, експлуатації та обслуговування енергетичних об'єктів. Я впевнений, що результати досліджень, представлені на цій конференції, стануть важливим кроком на шляху до нових інноваційних рішень у сфері відновлюваної енергетики.

Щиро бажаю всім учасникам конференції плідної праці, конструктивного обміну досвідом, нових ідей і професійних здобутків.

Декан Факультету електроенерготехніки
та автоматики «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
д.т.н., професор Василь БУДЬКО

УДК 621.311

МІКРОМЕРЕЖІ ЯК ЧАСТИНА ОПТИМІЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО РИНКУ

М. П. Кузнєцов

Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 03143, вул. Метрологічна, 50, м. Київ;
Національний технічний університет України «КПІ ім. І. Сікорського», 03056, просп. Перемоги, 37, м. Київ.
тел.: (066) 618-54-00, e-mail: nik_ku@ukr.net.

Мікромережі пропонують вирішення низки проблем, притаманних централізованим мережам. Вирішальним фактором підвищення ефективності та стійкості мікромереж є оптимізація їх гібридних конфігурацій, які об'єднують джерела відновлюваної енергії, накопичувачі та традиційну генерацію. Мікромережі можуть працювати в мережевому та острівному режимах, компенсувати мінливість відновлюваних джерел енергії (вітрової, сонячної) і навантажень за рахунок горизонтальної й вертикальної взаємодії.

Ключові слова: *мікромережа, відновлювані джерела енергії, розподілена генерація, оптимізація, математична модель.*

MICROGRIDS AS PART OF AN OPTIMIZED ELECTRICITY MARKET

M. Kuznietsov

Institute of renewable energy, NAS Ukraine, 03143, Metrolohichna str. 50, Kyiv;
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute», 03056, 37 Peremohy Av.

Microgrids offer solutions to a number of problems inherent in centralized grids. A crucial factor in increasing the efficiency and sustainability of microgrids is the optimization of their hybrid configurations, which combine renewable energy sources, storage and traditional generation. Microgrids can operate in grid and island modes, compensate for the variability of renewable energy sources (wind, solar) and loads through horizontal and vertical interaction.

Key words: *microgrid, renewable energy, distributed generation, optimization, mathematical model.*

ORCID: 0000-0002-0497-7439

Запровадження розподіленої генерації вважається ефективним шляхом переходу до стійкішої енергосистеми, що спирається на місцеві ресурси та відновлювані джерела енергії. В Україні такий перехід набуває особливої ваги через як економічні, так і інші (соціальні, екологічні, політичні) обставини. Малі та локальні системи розподілу включно із системами зберігання та навантаження, визначаються як мікромережі (ММ, або micro grid). Відповідно до стандарту IEC TS 62898 [1] мікромережа є групою взаємопов'язаних навантажень і розподіленої генерації з визначеними електричними межами, що утворюють локальну електроенергетичну систему на рівні системи розподілу електричної енергії, що діє як єдиний керований об'єкт і здатна працювати в умовах приєднання до систем розподілу або в ізольованому (острівному) режимі роботи. Сьогодні в Україні найочевиднішою перевагою мікромереж є забезпечення живлення споживачів в умовах відключень електропостачання. Заразом одним з аргументів впровадження ММ є зниження витрат на закупівлю електричної енергії для їхніх користувачів шляхом оптимізації роботи обладнання.

Мікромережі гібридного типу включають різні джерела енергії, що забезпечує підвищення стійкості, зменшення викидів вуглецю та зміцнення енергетичної безпеки. Водночас сонячна та вітрова енергія, з їх непостійністю, створюють особливі проблеми, які вирішуються методами структурної оптимізації. Використання накопичувачів енергії є поширеним підходом до компенсації стохастичного характеру відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Інтегрована ММ із засобами зберігання енергії може працювати в автономному та мережевому режимах, збалансовуючи попит та виробництво електроенергії, отже, може працювати й у разі значних коливань параметрів.

Зазвичай у складі мікромережі розглядаються генерувальні установки різних типів: некеровані, керовані установки та системи акумулювання енергії, – якими керує оператор ММ. Оператор дає змогу врахувати параметри й режими роботи різнотипних джерел і вибирає для них стратегії роботи, що принесуть найбільшу вигоду для всіх учасників. Такий механізм керування спонукає всіх учасників до оптимальної взаємодії задля максимізації власного виграшу, що не суперечить стратегії отримання максимального прибутку самим оператором ММ. Зі зростанням складності

проєктів мікромереж посилюється потреба оптимізувати використання систем проміжного зберігання енергії, стратегії реагування на попит (demand response), особливо в ММ зі значною часткою відновлюваної генерації. Оптимізація складу ММ виконується за різними критеріями. Враховуючи екологічну спрямованість відновлюваної енергетики, цільовими функціями часто вибирають як вартість енергії (що притаманно усім стратегіям), так і обсяг шкідливих викидів; використовується також трицільовий підхід: мінімізація експлуатаційних витрат і викидів забруднювальних речовин, синхронізація регульованих навантажень з роботою відновлюваних джерел енергії та зменшення втрат від примусового обмеження навантажень [2].

Формування критеріїв та обмежень в задачі оптимізації має враховувати взаємодію учасників енергосистеми, що відображається в потоках енергії. Це надходження від генераторів (станцій на ВДЕ) до споживачів, до засобів акумулювання, від акумуляторів до споживачів, від генераторів та акумуляторів до зовнішньої мережі (чи сусідніх ММ), від зовнішньої мережі до споживачів та до акумуляторів. Всі ці потоки мають відстежуватися в реальному часі з урахуванням чинних тарифів (спеціальних, зональних, тимчасових тощо) [3]. Як обмеження враховуються технічні можливості обладнання (обмеження за потужністю та зарядом), а також рівняння погодинних балансів електроенергії, обмеження для системи зберігання енергії.

Оптимізація структури ММ та алгоритмів її роботи має стосуватися як інтересів розподільної компанії (РК), так і надійного забезпечення споживачів енергії. У дворівневій задачі оптимізації верхній рівень прагне максимізувати прибутки як власників ММ, так і РК, тоді як нижній рівень присвячений забезпеченню балансу навантаження, управлінню розподіленою генерацією та споживанням.

З огляду на широке впровадження розподіленої генерації на основі використання ВДЕ розвивається концепція активних розподільних мереж (active distribution network). Це означає перехід від традиційних споживачів до виробників-споживачів (prosumers). Оскільки ресурси споживачів мають певну гнучкість, виникає потреба у відповідному механізмі обміну можливостями генерації та збереженні енергії для досягнення оптимального розподілу ресурсів. Створюється модель торгових стосунків шляхом інтеграції пристроїв ВДЕ та засобів акумулювання; потім формується децентралізована задача розподілу енергії для максимізації соціального добробуту.

Пропоновані підходи до організації енергосистеми, що складається з окремих мікромереж, потребують певного унормування стосунків між учасниками, зокрема законодавчого. Від 2019 року в Україні функціонує нова модель ринку електроенергії, що базується на принципах прозорості, конкурентоспроможності та вільного доступу виробників, постачальників та непобутових споживачів до інформації щодо цін на електричну енергію. Базовим документом тут виступає Закон України «Про ринок електричної енергії» [4]. У законі пропонується поняття «Активний споживач», фактично узаконюється поняття виробника-споживача (при цьому передбачено можливості обміну енергією, в тому числі збереженою, і не заперечується можливість передачі акумулювальних потужностей в оренду). «Балансуюча група» – об'єднання учасників ринку, яке несе відповідальність за баланс електричної енергії. Отже, існує можливість створення віртуальної мікромережі, учасники якої задіяні в балансуванні попиту та пропозиції. Особливо підкреслено можливість використання ВДЕ. Передбачено існування механізму торгівлі надлишками електроенергії. Передбачено також ринок допоміжних послуг і роздрібний ринок електричної енергії. Уточнено поняття зберігання енергії як системи спеціальних послуг зі збереження та подальшого обміну енергією, що є основою активної розподільної мережі. До розподіленої генерації віднесена електростанція встановленої потужності до 20 МВт, приєднана до системи розподілу. Можлива і нижня межа потужності; це спрощує адміністрування ринку.

Отже, створена в Україні законодавча база загалом сприяє організації активних розподільних мереж, що стимулює розроблення оптимальних алгоритмів їх формування та роботи. Відповідно до ринкових моделей виробники електричної енергії з ВДЕ безпосередньо можуть виступати як учасники ринку; крім того, вони вмотивовані створювати окремі балансувальні групи як віртуальні об'єднання, що матимуть можливість управляти небалансами власного портфеля об'єктів у режимі реального часу. Звичайно, в такому разі сама мікромережа також має віртуальний характер, що не виключає потреби в оптимізації алгоритмів співпраці окремих учасників.

ПОСИЛАННЯ

1. EC TR 62898-1. Microgrids – Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. IEC, 2023. 86 p.
2. Kalim Ullah at al Energy optimization using hybrid demand response, renewable energy, and storage battery: A tri-objective optimization approach. Sustainable Cities and Society, 2025, 106145, ISSN 2210-6707, https://doi.org/10.1016/j.scs.2025.106145.
3. Блінов І. В. та ін. Модель оптимізації функціонування мікромережі з СЕС та установкою зберігання енергії. ISSN 1607-7970. Техн. електродинаміка, 2024, № 5. С. 69–78.
4. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 04.11.2021).

УДК 621.311

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ІНТЕГРОВАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ СПОЖИВАЧІВ ВІД НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

І. О. Гунько[1], П. Д. Лежнюк[1, 2]

[1]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, 02094, м. Київ, Україна
[2]Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21000, Україна
тел.: (097) 938-36-78, e-mail: iryna_hunko@ukr.net

Дослідження присвячене визначенню частки потужності, отриманої споживачем із низьковуглецевих джерел енергії, з урахуванням втрат під час передачі електроенергії. Запропонований метод сприяє оптимізації роботи інтегрованих енергетичних систем та підвищенню прозорості походження електроенергії для екологічно відповідального бізнесу.

Ключові слова: *інтегрована енергетична система, низьковуглецеві джерела енергії, походження електроенергії.*

FORMATION OF THE STRUCTURE OF THE INTEGRATED ENERGY SYSTEM FOR ELECTRICITY SUPPLY TO CONSUMERS FROM LOW-CARBON ENERGY SOURCES

I. Hunko[1], P. Lezhniuk[1, 2]

[1] The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrologichna St., 02094, Kyiv, Ukraine
[2] Vinnytsia National Technical University,
95 Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21000, Ukraine
phone: (097) 938-36-78, e-mail: iryna_hunko@ukr.net

The research is devoted to determining the part of power received by a consumer from low-carbon energy sources, taking into account losses during electricity transmission. The proposed method improves the performance of integrated energy systems and increases the transparency of electricity origin for environmentally responsible businesses.

Key words: *integrated energy system, low-carbon energy sources, electricity origin.*

ORCID: [1]0000-0003-2868-4056; [2]0000-0002-9366-3553

Постановка задачі

Вирішення проблем зміни клімату та глобального потепління потребують активних дій зі скорочення викидів CO_2 як у промисловому, так і в енергетичному секторах. Поцес декарбонізації в енергетиці передбачає перехід від використання викопних ресурсів з високим вуглецевим слідом до низьковуглецевих джерел енергії (НВДЕ) таких як сонце, вітер, вода й атомна енергія, вироблена на сучасних малих модульних реакторах. Незважаючи на те що питанням декарбонізації займаються понад 70 років, багато задач усе ще потребують вирішення. Уряди розвинених країн світу провадять як внутрішню, так і зовнішню політику, спрямовану на популяризацію, розвиток та інтегрування низьковуглецевих технологій виробництва електроенергії, використовуючи різні механізми, серед яких, GO, PPA договори, CBAM та ін. Слід звернути увагу, ще й на те, що для компаній, які керуються стандартами ESG (Environmental, Social, Governance) та прагнуть вести свій бізнес екологічно відповідально, необхідно мати підтвердження споживання низьковуглецевої енергії, зокрема й для того, щоб уникнути податків при експорті продукції до ЄС, а також бути конкурентними на міжнародних ринках. А тому визначити джерело походження електроенергії в енергоміксі такого споживача є актуальною задачею.

Поступовий перехід до децентралізованого електропостачання привів до розбудови різнотипних розосереджених джерел енергії в межах однієї або кількох територіальних громад. Як наслідок, утворюються інтегровані енергетичні системи (ІЕС) – як новий тип енергетичних систем, що базуються на застосуванні сучасних Smart Grid інформаційних технологій та інтелектуальному керуванні, в яких комплексно використовується електрична й теплова енергія, природний газ та інші доступні джерела енергії та тепла. Приклад такої ІЕС показано на рис. 1 [1].

У контексті декарбонізації компаніям, чиї виробничі потужності перебувають у межах такої ІЕС, важливо знати походження споживаної ними електроенергії, задля можливості маркувати її відповідним чином.

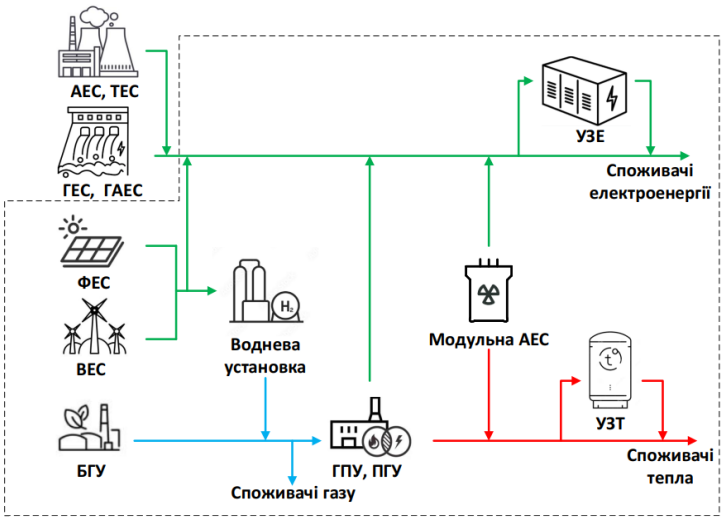


Рис. 1. Інтегрована енергетична система

У дослідженні пропонується метод визначення частки потужності, отриманої споживачем з низьковуглецевих джерел енергії, особливо якщо вони різнотипні та перебувають на різній віддалі від споживача. Оскільки частина цієї потужності втрачається під час транспортування, то для точнішого оцінювання техніко-економічної ефективності постачання електроенергії споживачеві від НВДЕ визначаються відповідні втрати електроенергії в електричних мережах. Визначені втрати можуть бути використані також у різних моделях ринкових відносин, особливо в частині компенсації їх вартості [2].

Суть методу визначення частки перетікань потужності в електричних мережах від сукупності НВДЕ до вузлів споживачів, зокрема й зацікавлених в отриманні «чистої» електроенергії, полягає в тому, що спочатку встановлюються значення повної потужності на початку і в кінці кожної вітки схеми, що визначається за формулою [2]:

$$\dot{\mathbf{S}}_{в} = \sqrt{3}\dot{\mathbf{U}}_{\partial}\mathbf{M}_{\Sigma}\hat{\mathbf{I}}_{\partial}, \quad (1)$$

де $\dot{\mathbf{S}}_{в}$ – матриця потужності, в якій у стовпцях наведено значення потужності початку й кінця у вітках електричної мережі; $\dot{\mathbf{U}}_{\partial}$ – діагональна матриця напруги у вузлах, включно з балансувальними; $\mathbf{M}_{\Sigma}$ – матриця з'єднань віток у вузлах, включно з балансувальними; $\hat{\mathbf{I}}_{\partial}$ – діагональна матриця струмів у вітках схеми (тут і далі знак $\widehat{\ }$ означає, що матриця або вектор є спряжений).

Помноживши зліва вираз (1) на одиничний транспонований вектор $\mathbf{n}_t$, отримаємо транспонований вектор втрат потужності у вітках схеми:

$$\Delta\dot{\mathbf{S}}_{вt} = \sqrt{3}\cdot\mathbf{n}_t\dot{\mathbf{U}}_{\Sigma\partial}\cdot\mathbf{M}_{\Sigma}\hat{\mathbf{I}}_{\partial}, \quad (2)$$

Введемо вектор $\dot{\mathbf{V}}_i$, що визначатиметься як:

$$\dot{\mathbf{V}}_i = (\dot{\mathbf{U}}_t\mathbf{M}_{\Sigma i})\hat{\mathbf{C}}_i\dot{\mathbf{U}}_{\partial}^{-1}, \quad (3)$$

де $\dot{\mathbf{U}}_{\partial}$ – діагональна матриця напруг у вузлах без балансувальних вузлів.

Вектор-рядок $\dot{\mathbf{V}}_i$ складається з коефіцієнтів, які показують, яку частку в сумарних втратах *i*-ї вітки викликає протікання по ній потужності від кожного вузла. Вираз втрат потужності в *i*-й вітці перепишеться:

$$\Delta\dot{S}_{вi} = \dot{\mathbf{V}}_i\dot{\mathbf{S}}_{\Sigma}. \quad (4)$$

Визначення втрат потужності важливо ще й з погляду оптимізації режиму роботи ІЕС, вибору оптимальної конфігурації системи електропостачання.

Висновки. Запровадження інтегрованих енергетичних систем сприяє оптимізації енергоспоживання та використання сучасних Smart Grid технологій для підвищення ефективності управління енергоресурсами. У цьому контексті важливим є визначення джерела походження електроенергії для підприємств, які керуються стандартами ESG, що дозволяє їм уникати екологічних податків та зберігати конкурентоспроможність на міжнародних ринках. Запропоновано метод визначення частки потужності, отриманої споживачем із низьковуглецевих джерел енергії, з урахуванням втрат у процесі передачі та розподілу електроенергії. Визначення цих втрат є важливим для формування економічно ефективних ринкових механізмів, а також для оптимізації роботи інтегрованих енергетичних систем.

ПОСИЛАННЯ

1. Yang Li, Fanjin Bu, Jiankai Gao, Guoqing Li, Optimal dispatch of low-carbon integrated energy system considering nuclear heating and carbon trading. Journal of Cleaner Production, Volume 378, 2022, 134540, ISSN 0959-6526, https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134540.
2. Hunko I., Kudrya S., Komar V., Lezhniuk P. Mathematical Model and Algorithm for the Determination of the Origin of Electricity From Renewable Energy Sources in the Electric Power System. Відновлювана енергетика. 2024. № 2. Pp. 6–12. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)6-12

УДК 621.311

ЛОКАЛЬНА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ ВДЕ ЯК СУКУПНІСТЬ АГРЕГОВАНИХ MICROGRID

П. Д. Лежнюк[1], О. С. Кульматицький[2], Є. О. Нікіторович[3]

Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна,
тел.: (067) 705-61-38, e-mail: lezhpd@gmail.com

Пропонується інтегрувати ВДЕ в розподільні електричні мережі у вигляді окремих microgrid (MG), які є ключовою частиною переходу до ЛЕС з функціонуванням на принципах SMART Grid. MG об'єднуються в інтелектуальну систему керування задля раціонального використання ресурсів, ефективної взаємодії з електричною мережею і використання системи зберігання енергії в процесі балансування режиму ЛЕС.

Ключові слова: *локальна електроенергетична система, агреговані* microgrid, *інтелектуалізація.*

LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEM BASED ON RSE AS A SET OF AGGREGATED MICROGRID

P. Lezhniuk[1], O. Kulmatytskyi[2], E. Nikitorovych[3]

Vinnytsia National Technical University,
95 Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21000, Ukraine
phone: (067) 705-61-38, e-mail: lezhpd@gmail.com

It is offered to integrate RSE into distribution power grids in the form of separate microgrid (MG), which is a key part of the transition to a LEPS based on SMART Grid principles. MGs are combined into an intellectual control system for the rational use of resources, efficient interaction with the power grid and the use of energy storage systems in the process of balancing the LEPS mode.

Key words: *local electric power system, aggregated microgrid, intellectualisation..*

ORCID: [1]0000-0002-9366-3553; [3]0009-0008-2209-0189.

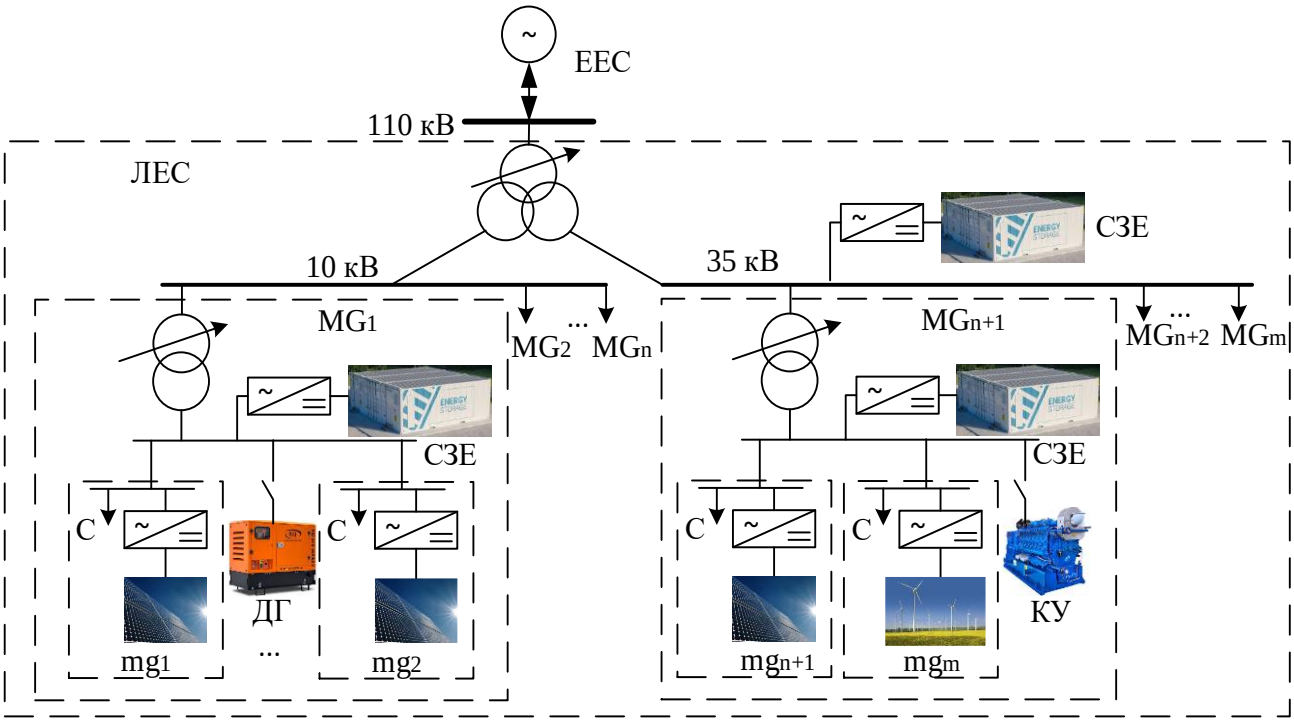
Пропонується ієрархічна структура інтелектуальної системи локальної електроенергетичної системи (ЛЕС), що може працювати як паралельно з електроенергетичною системою (ЕЕС), так і ізольовано від неї в автономному режимі. Завдяки інтелектуальній системі в ЛЕС реалізуються принципи SMART Grid, і вона функціонує як інформативно-енергетична система. Сформована таким чином ЛЕС може працювати як самостійна збалансована група в складі ЕЕС, виконуючи завдання оператора системи розподілу залежно від напруги й потужності її складових microgrid. В ЛЕС підтримується баланс електроенергії:

$$\pm P_{EEC}(t) + P_{ФЕС}(t) \pm P_{СЗЕ}(t) - P_{сп}(t) - P_{ас}(t) - \Delta P(t) = 0\,, \qquad (1)$$

де $P_{EEC}(t)$ – потужність від ЕЕС; $P_{ФЕС}(t)$ – потужність ФЕС; $\pm P_{СЗЕ}(t)$ – потужність системи зберігання енергії; $P_{сп}(t)$ – потужність споживачів електроенергії, які працюють за своїм графіком; $P_{ас}(t)$ – потужність активних споживачів, які працюють за скоригованим графіком; $\Delta P(t)$ – технологічні витрати в електричних мережах.

Складне техніко-економічне завдання підтримування балансу потужності та електроенергії вирішується простіше, якщо реалізовувати й експлуатувати такі комплекси як окремі microgrid, об'єднавши їх в інтелектуальну систему керування режимами ЛЕС. На рисунку наведена структура реальної достатньо потужної ЛЕС на різних напругах, яка сформована з microgrid (MG) зі своїми місцевими системами автоматичного керування (САК). Microgrid MG_i в різному наборі можуть містити фотоелектричні й вітрові електростанції, системи зберігання електроенергії (СЗЕ), дизель-генератори для відновлення генерування ФЕС в ізольованому стані, когенераційні установки (КУ) на біогазі та електроспоживачі (С), зокрема активні. Потужні microgrid MG_i об'єднують microgrid меншої потужності mg_i. СЗЄ залежної від ємності накопиченої електроенергії зберігаються на шинах MG_i або на збірних шинах вищої напруги. В останньому випадку СЗЕ можуть поповнювати запаси електроенергії безпосередньо з ЕЕС у вигляді комерційної послуги. Джерелами централізованого живлення від ЕЕС є атомні електричні станції (АЕС), теплові електростанції (ТЕС), гідроелектростанції (ГЕС), гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС). Якщо споживачі електроенергії ЛЕС вмотивовані отримувати електроенергію від ВДЕ або від декарбонізованих джерел, які є в ЕЕС, то в САК ЛЕС закладається програмне забезпечення згідно з методом, описаним в [1].

У сформованій таким чином ЛЕС на основі MG з відновлюваними джерелами енергії та резервуванням їх нестабільності генерування у формі СЗЕ досягається надійність електропостачання, а також можливість спостерігати за режимами й керувати ними. За рахунок інтелектуалізації ЛЕС і використання принципів SMART Grid реалізується самовідновлення як здатність системи автоматично відновлюватися після збоїв та стійкість як міра здатності протистояти аварійним ситуаціям з тяжкими наслідками. Як елемент Smart Grid самовідновлення ґрунтується на функціях двосторонніх комунікацій у мережі, дистанційного моніторингу і самодіагностики обладнання, стандартах попередження розвитку системних аварій, керування потоками потужності й напругою тощо.



Локальна електроенергетична система, сформована з microgrid

До складу виокремленої в ЕЕС локальної системи входять джерела електроенергії, резервна система накопичення енергії та споживачі електроенергії, які об'єднані розвиненими електричними мережами різної напруги. З погляду системи керування ЛЕС є складними розосередженим об'єктом, який складається з окремих агентів, призначених реагувати на змінні поточні стани ЛЕС і формувати колективні дії для забезпечення надійного електропостачання споживачів. Автономні агенти приймають рішення з керування і складають мультиагентну систему.

На верхньому рівні локальний агент ЛЕС (ЛЕСА) є елементом нижнього рівня оператора системи розподілу (ОСР). За умови паралельної роботи з ЕЕС на цьому рівні ЛЕСА здійснює функції балансувальної групи в складі ЕЕС, координуючи свої дії з ОСР. На цьому рівні основним поточним завданням є прогноз споживання й генерування електроенергії в ЛЕС і здійснення обміну електроенергією з ЕЕС. Для цього формується база даних через запити на інформацію агентів середньої ланки microgrid MGA і MGA_i. Під час відділення ЛЕС з ЕЕС змінюються завдання і зміст функцій, які мають виконуватися АСК. На ЛЕСА покладаються функції внутрішнього балансування потужності й електроенергії та підтримування техніко-економічних показників системи електропостачання в допустимих значеннях. Насамперед це стосується підтримування в ЛЕС частоти і напруги на шинах споживачів. Це здійснюється колективними діями агентів середнього і технічного рівня шляхом подачі на них відповідних робочих команд. Здійснюється оптимальне керування активними споживачами, а також обмеження, в разі потреби, потужності неактивних споживачів.

Висновки. Локальні електроенергетичні системи на основі ВДЕ доцільно виділяти в ЕЕС зі створенням в них інтелектуальних систем керування режимами. ЛЕС з ВДЕ і засобами зберігання електроенергії пропонується формувати у вигляді окремих microgrid, які є ключовою частиною переходу до ЛЕС з функціонуванням на принципах SMART Grid. Місцеві MG окрім джерел генерування і споживачів мають також засоби накопичення певної кількості енергії. В автономному режимі ЛЕС залежно від ємності системи зберігання енергії може бути повноцінним резервом ВДЕ і використовуватися для оптимізації потоків потужності та підтримування частоти й напруги.

ПОСИЛАННЯ

1. Hunko I., Kudrya S., Komar V., Lezhniuk P. Mathematical Model and Algorithm for the Determination of the Origin of Electricity From Renewable Energy Sources in the Electric Power System, Vidnovluvana Energetika , 2(77), p. 6-12. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)

THE INTEGRATION OF RENEWABLE ENERGY IN GLOBAL ENERGY SECURITY STRATEGIES

A. Mammadzada

Social Sciences Institution / Istanbul University,
Suleymaniye Distirct Besim Omerpasa str., Istanbul, Turkey, 34116
phone: (90) 536-575-27-09, e-mail: a.mammadzada@student.uw.edu.pl

I have explored the role of renewable energy integration in enhancing global energy security and addressing sustainability challenges through the study and analysis of its impact and potential contributions.

Keywords: *Integration, Energy Security, Fossil Fuels, Global Strategies, Renewable Energy, Global South, Solar Energy, Energy System, Risk.*

ORCID: 0009-0005-5097-0448

Energy security, the reliable availability of energy resources at an affordable price, is a key component of national and international strategies in the 21st century. With the increasing global energy consumption and the effects of climate change, renewable energy sources have become integral for ensuring sustainable energy security (Osuma, & Yusuf, 2025). Solar energy, wind, hydro, and biomass are renewable energy sources that are clean, plentiful, and available domestically in many areas. Their integration into energy systems decreases reliance on imported fossil fuels, which are susceptible to geopolitical tensions and price volatility. For example, the European Union has identified renewable energy as a priority sector to reduce dependence on Russian gas in the context of recent geopolitical crises. In a parallel process, numerous countries in the Global South are utilizing renewables as a way to increase energy autonomy and bolster economic development. Furthermore, renewable energy enhances energy security through the diversification of energy portfolios. Renewables are less concentrated than fossil fuels, which are found in certain places. This geographical dispersion reduces the risk of supply disruptions. In addition, the reliability of renewable energy is bolstered by innovations in decentralized energy systems and energy storage technologies that lessen vulnerabilities to grid failures and enable power availability during peak demand. Investments in renewables are also in line with national strategies to curb climate change, which represents an existential threat to future energy security. Climate-related disruptions, including extreme weather events, can threaten fossil fuel infrastructure. On the other hand, renewable energy systems, especially those implemented with resilience in mind, are at least better at weathering those challenges (National Renewable Energy Laboratory, 2020). In conclusion, renewable energy in global energy security strategies is an overarching narrative. The success of renewable energy technologies and their integration into global energy security strategies can pave the way toward globally sustainable, resilient, and equitable energy systems. Renewable energy not only fortifies energy security by reducing reliance on fossil fuels, increasing diversification, and mitigating climate risks but also lays the foundation for a cleaner and more resilient future.

REFERENCES

1. Towards an optimal renewable energy mix for the European Union: Enhancing energy security and sustainability. Osuma, G., & Yusuf, N. (2025). Journal of the Knowledge Economy. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s13132-024-02586-5?utm_ (date of application: 07/15/2025).
2. Renewable energy to support energy security. National Renewable Energy Laboratory. (2020). Retrieved from: https://www.nrel.gov/docs/fy20osti/74617.pdf?utm_ (date of application: 11/04/2021).
3. A comprehensive review of renewable energy development, challenges, and policies of leading Indian states with an international perspective. Elavarasan, R. M., Shafiullah, G. M., Padmanaban, S., Kumar, N. M., Annam, A., Vetrichelvan, A. M., Mihet-Popa, L., & Holm-Nielsen, J. B. (2020). IEEE Access, 8, 225656-225673. URL: https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText=Renewable%20Energy&highlight=true&returnFacets=ALL&returnType=SEARCH&matchPubs=true&openAccess=true (date of application: 09/03/2021).
4. 4. Fault ride through and intermittency improvement of renewable energy integrated MMC-HVDC system employing flywheel energy storage. Hossain, M. I., Hamanah, W. M., Alam, M. S., Shafiullah, M., & Abido, M. A. (2023). IEEE Access, 11, 4821-4833. URL: https://ieeexplore.ieee.org/search/searchresult.jsp?queryText=Renewable%20Energy&highlight=true&returnFacets=ALL&returnType=SEARCH&matchPubs=true&openAccess=true (date of application: 04/15/2023).

SCIENCE-BASED APPROACH FOR EFFICIENT DECISION MAKING IN THE ENERGY TRANSITION- THE CASE OF DISTRICT HEATING NETWORKS

K. Lygnerud[1], M. Cozzini[2], A. Menapace[3]
T. Brahim, A. Radoszynski, K. Karlsson[4]
O. Diachuk[5], R. Podolets[6], A. Semeniuk[7], O. Lysenko[8]

Swedish Environmental Research Institute, Eurac Research, Energy Modelling Lab,
Institute for Economics and Forecasting
e-mail: Kristina.lygnerud@energy.lth.se

To identify the most efficient pathway to decarbonize district heating systems, an energy systems model approach (TIMES) was applied and combined with conventional investment analysis, resulting in an investment-ready roadmap

Key words: *energy transition, efficiency, long-term goals, cost and emission efficiency*

ORCID: [1]0000-0001-7313-0621, [2]0000-0003-2773-5771, [3]0000-0003-0778-9721, [4]0000-0001-7749-254X, [5]0000-0002-3281-6536, [6]0000-0002-3276-5505, [7]0000-0003-2308-4713, [8]0000-0001-7085-7796

The district heating systems in Ukraine form a critical part of the national infrastructure, supplying heat to a significant share (ca. 40%) of the residents during the heating season. However, many of these systems, constructed over 50 years ago, have become inefficient due to ageing infrastructure and slow modernisation efforts. The situation was further exacerbated by Russia's invasion of Ukraine, which caused extensive negative impact on energy supply systems, including district heating. This has led to a further increase in energy losses, emphasising the urgent need for modernisation and rehabilitation of the district heating infrastructure.

In response to these challenges, the Ukrainian government developed during 2023-2024 the cornerstone documents to prioritize energy sector development. The Energy Strategy of Ukraine until 2050 approved in April 2023 (replacing the Strategy until 2035, adopted in 2017) sets long-term goals for energy efficiency, self-sufficiency, and integration with EU energy markets, emphasizing renewable energy and district heating modernization. The National Economic Strategy until 2030, revised in April 2023, promotes energy diversification and reduced energy imports, fostering the use of alternative energy sources, including renewables and waste heat. In addition, the State Target Economic Program for Energy Modernization of Heat Energy Producing Enterprises from November 2023 aims to enhance the efficiency and sustainability of district heating systems by 2030. Finally, in summer 2024, the government of Ukraine approved two significant action plans: the National Energy and Climate Plan (NECP)2 and the National Renewable Energy Action Plan (NREAP). The NECP harmonizes environmental, energy, and economic policies for sustainable development, while the NREAP sets ambitious targets to increase the share of renewable energy in heating and cooling from the current 20.8% to 32.5% by 2030. District heating plays a central role in these initiatives. Municipalities with significant district heating infrastructure, including Vinnytsia, are tasked with implementing these strategies.

For municipalities that own district heating networks, it is important to identify what actions to take, when to undertake them and at what cost to ensure that national and local, long-term goals are met. To accelerate this process, a science-backed approach is suggested. It relies on an energy system model (in TIMES) fitted to the city level. The model can be used to identify what assets to keep, what assets to phase out and what to replace them with. The model can also be resorted to for understanding what effect seasonal storage, carbon capture and storage/ usage, the inclusion of renewables, including waste heat and other sources, can have on system efficiency and reliability. The model applied has been developed to also include necessary information for the investor community, and the result of the modeling work is a transition pathway accounting for both technical and investment alternatives for decarbonizing a district energy system. The process is one of cooperation with relevant municipal stakeholders, where the city council and district heating companies both need to be involved to ascertain that there is consensus on the desirable future pathway of the district heating system in the city. A first pilot of this approach is being conducted by IVL – Swedish Environmental Research Institute for the city of Vinnytsia. IVL is supported by Energy Modelling Labs (Denmark), EURAC Research (Italy) and Institute for Economics and Forecasting (Ukraine). The pilot is managed by Nefco - the Nordic Green Bank, with financing provided by Sweden, through Sida. Nefco has successfully implemented projects on modernisation and energy efficiency improvement of district heating in Ukraine for over 15 years.

REFERENCES

1. From website 20205, Country information from the Keep Warm Project, https://keepwarmeurope.eu/countries-in-focus/ukraine/english/
2. Law No. 3991-IX (the Law) establishes Ukraine's overarching response to mitigate and adapt to climate change. The Law is aimed at implementing the EU's Regulation (EU) No. 2018/1999 on the governance of the Energy Union and the mitigation of climate change and Regulation (EU) No. 2021/1119, establishing a framework for achieving climate neutrality (the "European Climate law").
3. Loulou et al, 2005, Documentation for the TIMES Model -Part 1 ETSAP
4. Loulou et al, 2004 Documentation for the MARKAL Family of models, ETSAP
5. Information on Nefco, https://www.nefco.int/

FROM DEEP ENTRY IN ENERGY SUPPLY SYSTEMS PROCEDURE FOR USE

[1]D. Adbukhalilov, [2]A. Taslimov, [1]O. Mirkomilov

[1]Andijan State Technical Institute
+998 90 384 93 60 Bobur shokh Street, Andijan, 170019, Uzbekistan
dilshodekabduhalilov67@gmail,com
[2]Tashkent State Technical University

Abstract. *The article presents methods of using deep penetration in energy supply systems, their schemes.*

As a result of rapid development, the demand for electricity is increasing today due to the use of new innovative technologies in all spheres of economy, agriculture, industrial engineering and production. Based on this, the demand for electricity is increasing year by year compared to other types of energy. .

If we analyze the increase in demand for electricity and the dynamics of electricity consumption, a characteristic feature of the development of modern society is related to the rapid increase in the number of consumers and the urban population. Such an increase in cities and their regions will lead to a significant increase in electricity consumption. Based on this, it is considered appropriate to use deep penetration in energy supply systems implemented in countries with a developed energy system.

Currently, it is important to ensure the safety and stability of its operation in the transmission of electricity to consumers in electricity supply systems (ETT). When the required voltage is reached, a five-six step transformation using power transformers is necessary. Despite the rather high efficiency of transformers, which is 98-99%, the device contains electric and magnetic losses of up to 5-8% of the transmitted power. Reduction of transformation in solar power plants is one of the ways to reduce losses in the transmission and distribution of electricity. To solve such a pressing problem, SES uses "deep access" objects.

Deep access is a high-voltage supply network (35-220 kV) system for external energy supply to industrial enterprises located close to the center of consumer loads. In this case, the minimum number of stages of intermediate electricity conversion from the source to the receiver is used. Deep-conductor substations in the simplest layouts with a minimum amount of electrical equipment of 35 kV and above are carried out without busbars or switching devices on the primary voltage side. They are built next to a large freight hub. In large industrial enterprises, the system of deep entrances and branched substations has greatly simplified the task of voltage regulation.

As a result, the installation of intermediate distribution substations (OTP) can be avoided. The role of TJ is performed by 6-10 kV conductors of the secondary voltage of the 110-220 kV input substation (ChKP) [1].

The introduction of such substations in SES allows to reduce the length of cable lines, in contrast to the installation of a large main step-down substation, the number of transformation steps is reduced. As a result, the fault area, nominal currents and short-circuit currents are reduced when using such small substations.

Let's take a look at the perspective of implementing ChKP and what advantages it offers over the traditional SES scheme. As an example, let's consider the structure of the SES diagram of one of the cities and districts of a newly built city in Uzbekistan (Fig. 1, 2). The main network of the city is a 330 kV network [2]. The structure is characterized by a large number of changes in the required tension level – 5 levels: 330/110/35/6(10)/0.4.

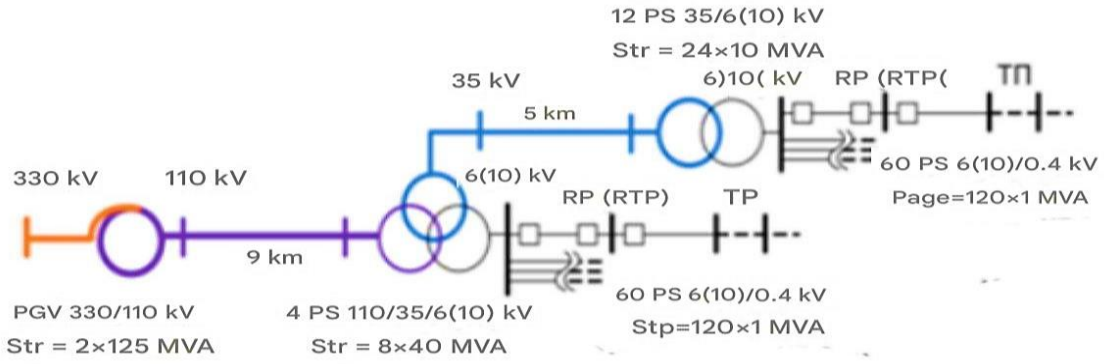


Fig. 1. District electricity supply system

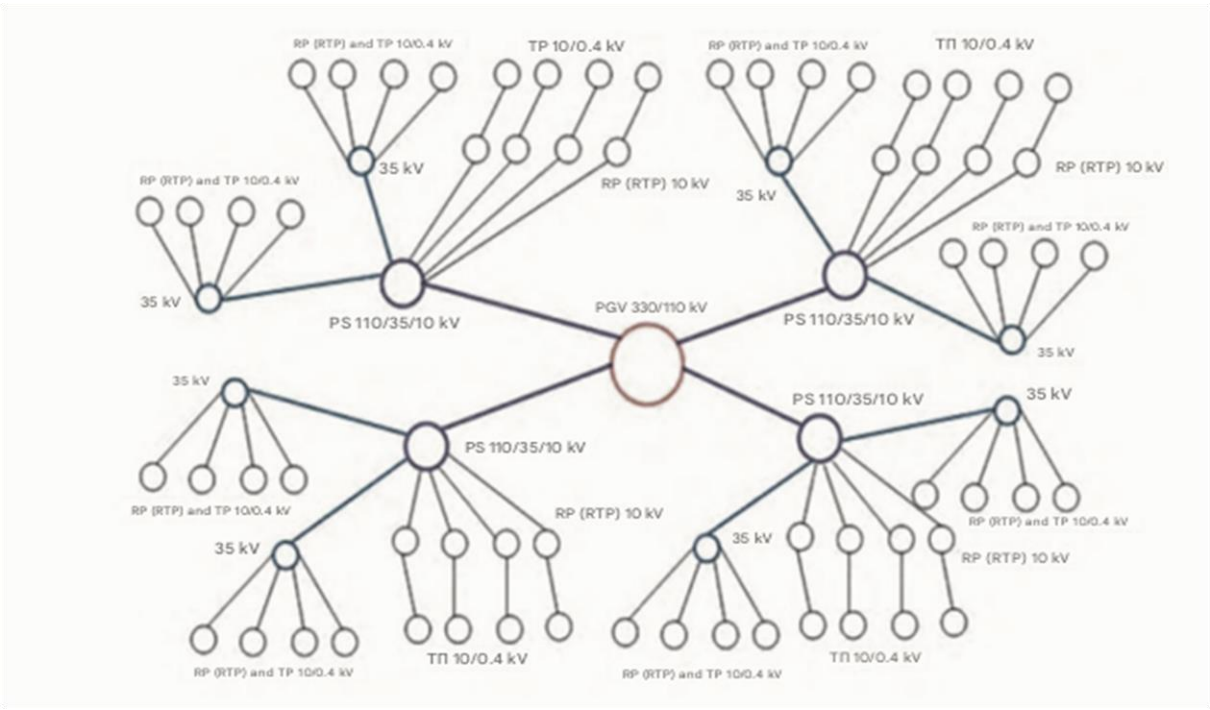


Fig. 2. The structure of the traditional electricity supply scheme for the region

It consists of expansion of 35 kV networks with a voltage of 10 (6) kV. To solve this problem, installation of 35/0.4 kV transformers is being introduced. This ensures minimal losses in power lines. The application of such a system is clearly shown in Fig. 3.

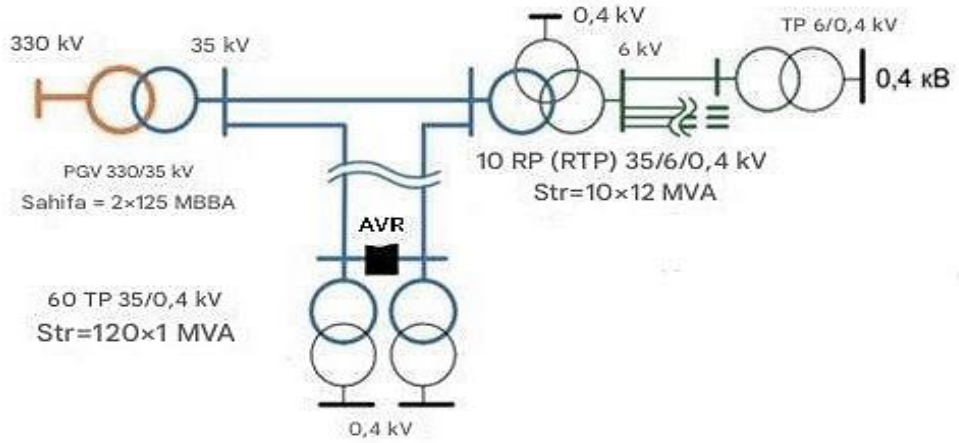


Fig. 3. Structure of district power supply scheme with 330/35 kV transformer

A comparison table is provided to show the parameters of the two schemes.

Comparison of traditional and improved SES scheme

Options	Traditional scheme	Improved scheme
Total capacity of transformers, MVA	1050	490
Losses in electric networks, MW	2,03	0,15
Transformer losses, MW	1,25	1,04
Salt performance losses, MW	8,47	1,24

The table data shows a significant reduction in parameters. The total power of transformers is 2.2 times less, taking into account losses. It can be concluded that the implementation of PGW will provide the following: increase the power

reserve for new connections of consumers, 0.4 kV to reduce the number of transformations for the transmission of electricity to consumers and significant load losses in transformers.

With the increase in population and the development of technology, the need for energy is increasing. This can lead to overloading of existing networks and problems with power supply reliability. Therefore, the use and expansion of deep solar power plants in cities, metropolises and industrial enterprises is one of the most urgent issues in the field of electric power [3].

However, there are certain disadvantages to building this facility. The installation and maintenance of such substations require significant financial costs.

Deep access substations are widely used abroad and are located in outdoor buildings, and in most cases, they are installed underground, which ensures safety for people and does not harm the environment. Based on the experience of using PGV in different countries, it allows:

- increasing the reliability of electricity supply;
- reducing the length of the low-voltage network, thereby reducing power and voltage losses;
- reducing the capacitive currents, which allows for doing without reactive power compensation units in most cases;
- reducing the short-circuit currents in the network;
- abandoning the facilities of intermediate distribution points, because their functions are performed by the secondary voltage conductors of deep entry substations [4].

Analyzing all the advantages and disadvantages of the deep access system, the use of facilities at this level is an important, necessary and promising area for the development and improvement of the energy efficiency of solar energy systems in cities and countries. It is the use of new technologies that makes the system more reliable, flexible and stable [5].

Summary: In newly built cities, 35 kV voltage is carried out by direct transmission to transformers through overhead and cable networks. Based on this, there is no need to use 6-10 kV overhead and cable networks. As a result, the power supply system.

As a result, the reliability of the power supply system, the increase of energy efficiency, the reduction of energy waste, and the savings of spending are achieved. On the basis of a deeply embedded network, if the methods of electricity supply reliability, energy efficiency and prevention of energy losses are properly organized, uninterrupted electricity supply is achieved in the system. If the energy supply system is introduced in the newly built objects, institutions and residential areas based on a deeply embedded network, if the devices and networks are selected correctly, it can be the basis for increasing the energy efficiency.

REFERENCES

1. Akchurina, S. A. Expediency of constructing deep inlets for power supply to new areas of cities/ Akchurina, S. A, Shvedov, G. V. Electricity, 2014, No. 4. P. 18-23. EDN RYLTFD.
2. Artemev M., Magdeev N., Brylynskyi A., The concept of development of electric networks of a metropolis based on the construction of 330 kV deep input substations and the extended use of 35 kV voltage class in distribution. Electric power. Transmission and distribution, 2014, No. 6(27), P. 104-108, EDN TWVXLN
3. Taslimov, A. D., Abduxalilov, D. K. (2023). KATTA SHAHARLARNING ELEKTR TA'MINOT TIZIMLARI VAYUQORI KUCHLANISHLI CHUQUR KIRISH TARMOQLARINI QO 'LLANILISHI. Educational Research in Universal Sciences, 2(14), 784-789.
4. Taslimov, A. D., Abduxalilov, D. K. (2023). SHAHAR ELEKTR TA'MINOTI TIZIMINI YUQORI KUCHLANISHLI CHUQUR KIRISHLARDAN FOYDALANGAN HOLDA TOPOLOGIK MODELINI YARATISH. Educational Research in Universal Sciences, 2(18), 195-200.
5. Abduxalilov, D. K. High-quality power transmission and methods to reduce energy loss. modern scientific research and innovations. Founders: International Science and Innovation Center, (5).

DEVELOPMENT OF RESEARCH ON RENEWABLE ENERGY SOURCES AND INCREASING THE CAPACITY OF HEI IN THE RUZ THROUGH THE IMPLEMENTATION OF THE ERASMUS+ PROGRAM

Rayimjon Aliev[1], Mahfuza Alinazarova

Andijan State University,
129 University str., Andijan, Uzbekistan, 710100
phone: (998) 90-216-72-60, e-mail: alievuz@yahoo.com

The results of the implementation of the Erasmus+ projects RENES and DEBSEUZ are presented using the example of Andijan State University. Scientific and educational aspects of capacity building are analyzed.

Key words: *renewable energy sources, photovoltaic, hybrid energy sources, Sentaurus TCAD, RESLab, Erasmus+, RENES, DEBSEUZ.*

ORCID: [1] 0000-0002-7375-727X.

Erasmus+ educational projects play an important role in the development of renewable energy sources in the Republic of Uzbekistan. Such projects make it possible to strengthen the integration of higher educational institutions of the republic with European universities. There is not only an increase in the potential of universities, but also a quantitative and qualitative improvement in conducted scientific research. In this work, we will analyze the results of the RENES project (2016-2019) and the activities of the DEBSEUZ project (2023-2026) for the development of renewable energy sources. In project 574055-EPP-1-2016-1-IT-RPPKA2-CBHE-JP "Development of Master Programme in Renewable Energy Sources and Sustainable Environment" (RENES) University of L'AQUILA – UNIVAQ, Technische Universitaet Berlin – TUB, Kungliga Tekniska Hoegskolan – KTH, Chimiko Technologichen i Metalurgichen Universitete – UCTM and 6 Uz Universities participated [1].

The project corresponds to priority directions of development of Uzbekistan, the confirmed Decision of the President of Republic Uzbekistan accepted from 5.26.2017 «Measures on the further development of renewable energy, power efficiency increase in branches of economy and social sphere for 2017-2021» The RENES project is accompanying the implementation of the Decree on Measures for the Further Development of Alternative Energy Sources of March 1, 2015, the Program of Measures to Reduce Energy Intensity, the Implementation of Energy-Saving Technologies in the Economy and Social Spheres for 2015-2019, of May 5, 2015 and one of the directions of the adopted strategies for further development of Uzbekistan for 2017-2021, that is, a reduction in the energy intensity and resource intensity of the economy, widespread introduction of energy-saving technologies into production, the improvement of labor productivity in the economic sectors.

Consistent work is being carried out to improve the efficiency of the use of renewable energy sources. It has great potential in this area: water flows, the sun, wind and other resources. Currently, under the leadership of the head of state, a number of measures are being implemented to further strengthen the energy independence of Uzbekistan through renewable energy sources and the expansion of international cooperation in this direction. By 2025, it is planned to spend 314.1 billion UZS ($81 million USD) from the state budget and attract 20.5 trillion UZS (5.3 billion USD) in the form of foreign investment on the development of hydro, electric and solar energy. Uzbek leader approved targeted parameters on further development of renewable energy, which envisages to increase the share of renewable energy in structure of generating capacities from 12.7% to 19.7% by 2025, including hydro power from 12.7% to 15.8%, solar energy – to 2.3% and wind energy to 1.6%.

The government considers the efficient use of electricity and the replacement of traditional energy sources with renewable energy sources as a key factor for the competitiveness of the Uzbek economy and the improvement of the living standards of population. For that reason, in Uzbekistan, the demand for highly qualified personnel in the field of renewable energy sources is higher than ever, whereas universities offering the MSc programs in this field are still very few and the teaching staff not sufficient to prepare the needed human capital for implementing the expected change.

The RENES aims to provide the Uzbek universities with pilot MSc curricula in this field and to enhance competences and skills of young teachers in strict cooperation with European Universities, have proved to be not only extremely relevant for copying with the territorial needs and constraints but also a winning strategy for the enhancement of the HE system.

The main goals of the project: Degree Programs in RES and sustainable environment coherent with European standards; Uzbek teachers' skills in energy and environment areas updating, new labs establishment suitably equipped for performance of renewable energy related tasks and offering trainings to enterprises and public administration institutions, have been achieved.

The new profile of engineer expert of Renewable Energy sources and sustainable environment able to solve local and regional environmental and energy problems of industries, public institutions/societies in Uzbekistan has been created and the curriculum accredited.

Furthermore a sound methodology for designing and implementing academic curricula has been successfully transmitted by European partners to the UZ universities for future further enhancement of Degree Programmes.

The implementation of the second DEBSEUZ project (2023-2026) made it possible to further expand the potential of a number of universities in Uzbekistan. This project involves Politecnico Di Torino (POLITO), Italy, Universidade de Evora (UEVORA), Portugal, Universidad Politecnica De Madrid (UPM), Spain and 7 UZ universities.

The potential to produce clean, carbon-free electricity from solar sources in most countries dwarfs their current demand for electricity. Based on the World Bank Report No. 149846 dated June 22, 2022 on the potential of solar photovoltaic energy by country, it can be safely stated that about 20% of the world's population lives in 70 countries with excellent conditions for solar photovoltaic energy. In countries with high potential, the solar energy resource is relatively constant in different months of the year. The Republic of Uzbekistan is one of the countries with a high potential of solar energy; this fact directly affects the energy policy of the country, as a result of which special attention is paid to the development of "green" energy in the Development Strategy of New Uzbekistan, designed for 2022-2026. According to the longterm plan, by 2026 the capacity of solar energy plants in Uzbekistan will increase to 8,000 MW, which will be up to 18% of the country's needs. The growth in demand for solar energy provokes an increase in demand for highly qualified specialists in this area; filling this gap is crucial to fulfill the energy policy targets of Uzbekistan and to ensure enabling conditions for the growing of this sector and attraction of ever increasing direct foreign investments.

The project is aimed at solving the problem of the lack of qualified highly specialized professionals in the installation, management, exploitation, maintenance of solar energy systems and its components in the Republic of Uzbekistan. The project is put forward in accordance with the Law of the Republic of Uzbekistan and is aimed at solving the tasks set in the Decrees of the President of the Republic of Uzbekistan and the resolutions of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

The main objective of the project is to develop educational programs and curricula for training in Uzbekistan bachelors in solar energy engineering (innovative curricula and training courses), as well as programs and advanced training courses for relevant adults (e.g. reskilling of electrical engineers) in the field of solar energy engineering.

The important achievements of the implementation and sustainability of the above projects are as follows:

- a RES laboratory was organized in 1 room with an area of 36 square meters in 2019 and currently it has expanded to 6 rooms with an area of 216 square meters. The laboratory is equipped with modern equipment manufactured in the USA, Spain, Germany, China and South Korea. The laboratory's computer network is equipped with high-speed Internet and is connected to the EUROPRAKTIK system (UK);
- during 2023-2024. managed to train more than 1000 young people interested in mastering the knowledge of launching and maintaining small solar photovoltaic stations on the recommendation of the regional administration;
- the qualitative and quantitative indicators of publications by employees of the scientific and educational laboratory have been significantly increased (Fig. 1).

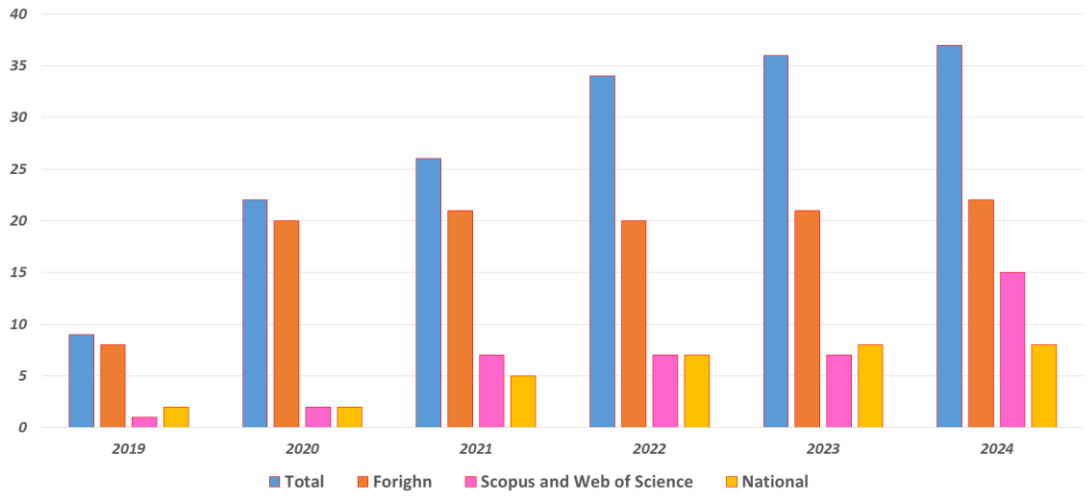


Fig. 1. Diagrmm of increasing of quality of research results as published articles on Scopus and Web of Science and other Journals for last 5 years

REFERENCES

1. 1. Development of Master Programme in Renewable Energy Sources and Sustainable Environment. Broshure Prepared by Turin Polytechnic University in Tashkent, Laborator of Renewable Energy Sources and Sustainable Environment Inoyatkhodjaev J., Niyazov F., Shirinov S., Safoev Sh. 2019 Tashkent, Uzbekistan. -40 p.

AUTONOMOUS HYBRID MICROPOWER STATION FOR USERS IN WARM CLIMATIC REGIONS

E. Goipov

Andijan State University
Тел: (90) 211 41 69. E-mail: 2251717elmurod@mail.ru

Low water pressure limits micro-hydro plants. A hydro-photo hybrid system with rotating solar panels boosts turbine efficiency by 7–8% and cools panels, ensuring stable power for rural areas.

Keywords: *hybrid energy system, solar photovoltaic, micro-hydro turbine, efficiency, COMSOL simulation.*

ORCID: 0000-0001-7500-3167

This study unveils a hybrid micro-energy system merging a solar photovoltaic (PV) module with a micro-hydroelectric power plant to tackle low water pressure and inadequate power generation in off-grid rural areas. The design incorporates a rotating PV module, configured as a truncated hexagonal pyramid, affixed to the jet hydro turbine's shaft to boost the moment of inertia and elevate turbine efficiency. Simulations using COMSOL Multiphysics demonstrate a 7–8% efficiency gain for the hydro-turbine in low-power scenarios, while rotation-induced cooling preserves solar panel performance. Panel temperatures spanned 28–58.6°C at 2–8 rad/s rotation speeds, curbing efficiency drops in hot climates. This hybrid setup provides a versatile, scalable option for sustainable energy in rural urbanization.

Rising electricity needs in rural and suburban zones, fueled by urbanization, demand creative renewable energy approaches. Micro-hydroelectric plants suit water-rich areas, yet low-pressure conditions (2–5 meters) often hinder output. Likewise, solar panels lose efficiency from overheating in warm regions. This research proposes a hydro-photo hybrid micro-energy system, pairing a micro-hydro turbine with a rotating PV module to enhance efficiency via cooling and inertia gains. The paper outlines the system's design, methods, and performance, emphasizing its role in decentralized energy solutions.

The hybrid setup includes a micro-hydroelectric plant with a jet turbine (impeller: 600 mm, flow: 0.2 m^3/s, power: 3 kW) and a PV module of six silicon panels in a truncated hexagonal pyramid (power: 1 kW, efficiency: 20%). Mounted on the turbine shaft (rotating at 2–8 rad/s), it links to a battery and control unit. COMSOL Multiphysics simulations, using Multibody Dynamics and Heat Transfer interfaces, modelled performance under ASHRAE-derived hot climate conditions (10:00–16:00), evaluating temperature, efficiency, and stability metrics.

The hybrid system successfully controlled the solar panel's surface temperature, maintaining it within an ideal range, as shown by the numerical simulations. While uncooled panels attained temperatures of 80°C to 85°C during peak daylight hours, the average surface temperature of the panel stayed between 53°C and 56°C when running at a rotation speed of 2 rad/s. The efficiency of the panel was greatly increased by this temperature drop. The study also examined how rotational motion caused the solar panel to move out of its equilibrium position. The study also examined how rotational motion caused the solar panel to move out of its equilibrium position. The largest angular deviation at 8 rad/s was 6 degrees, and the displacement from the rotating centre was 0.04 meters. The vibration amplitude ranged from 0.0001 to 0.00022 meters at rotation rates of 3–4 rad/s and from 0.0006 to 0.0018 meters at 8 rad/s. It was found that 67 W of energy was needed to keep the panel rotating, which accounted for 24% of the energy that the panel lost to heating.

Conclusion

This hybrid solar-hydro system promises reliable decentralized power for low-pressure, high-solar regions, boosting turbine efficiency by 7–8% and maintaining PV output via cooling. Stable at 3–4 rad/s, it's scalable for rural grids. Future work should refine larger prototypes and minimize equilibrium shifts, enhancing its role in sustainable urban growth.

REFERENCES

1. Bozarov, O., et al. (2023). Hybrid solar-hydro autonomous energy system. Uzbekbekgidroenergetika Journal, 4(20), 49–53.
2. Prasetyo, S.D., et al. (2023). Hybrid PV/T collector system for sustainable energy harvest. Heliyon, 9, e13390.
3. Rajkumar, S., et al. (2020). Enhancing PV panel cooling using converging ducts. IET Renewable Power Generation, 14(2), 263–269.
4. ASHRAE Meteorological Database (accessed via COMSOL Multiphysics 6.1).

THE INFLUENCE OF ELECTRIC FIELD ON THE MOTION OF ELECTRONS IN MULTILAYER QUANTUM NANOSTRUCTURES

M. Nosirov[1], S. Matboboyeva, N. Yuldasheva, R. Aliev[2]

Andijan State University, 129, University str., Andijan, Uzbebistan
Phone: (+99890)-549-81-48, e-mail: nmz1964@yamdex.ru

The paper considers the modeling of electron motion in multilayer low-dimensional structures and studies the behavior of an electron in these structures depending on the number and parameters of the structures, as well as the influence of an electric field on them.

Keywords: *electron, multilayer structure, potential barrier, probability of finding, Schrödinger equation.*

ORCID: [1]0009-0000-9318-4088, [2]0000-0002-7375-727X.

The growth of global energy consumption and the aggravation of environmental pollution problems require the fastest possible development of renewable energy sources. Therefore, a number of scientific, applied and innovative studies are being conducted to improve the efficiency of renewable energy sources – semiconductor photovoltaic energy converters. Obtaining new promising mono- and polycrystalline multilayer nanostructures for highly efficient photovoltaic devices, studying their electrophysical and photoelectric properties, as well as studying their unique capabilities for the efficient use of energy sources, is one of the most pressing problems of our time.

Extensive research has been conducted to study multilayer structures, and new, unique technical and technological solutions have been found to create photoelectric converters and improve their efficiency. However, theoretical studies of the dependence of the probability of passage, reflection, and stay of electrons in two-, three- and four-layer structures on the number of layers, thickness and height of potential barriers, as well as external influences, have not been carried out sufficiently. Therefore, eliminating these problems is an important and urgent task today. The work is devoted to studying the behavior of charge carriers in multilayer quantum structures based on the laws of classical and quantum physics.

The calculation of electron states in semiconductor structures using the effective mass method is based on the solution of the stationary Schrödinger equation, which is one-dimensional for the motion of electrons in the direction perpendicular to the plane of the layers [1]. When solving problems related to the motion of electrons in structures, the solution of the Schrödinger equation for each layer is written as the sum of incident and reflected de Broglie waves, and the boundary conditions between the layers are used to determine the amplitudes of these waves [2, 3].

Let us consider a nanostructure consisting of N layers located between semi-infinite regions, where the potentials in each layer are considered constant:

$$U(z)=\begin{cases}U_0, z<z_0,\\ U_k, z_{k-1}<z<z_k\\ U_{N+1}, z>z_N\end{cases} \tag{1}$$

where z_k are the coordinates of the boundary between layers k- and k+1, k = 1,...,N. The solution of the Schrödinger equation in the k-layer is written as

$$\psi_k = A_k e^{i\gamma_k z}, \tag{2}$$

where A_k and B_k are the amplitudes of the k-incident and reflected de Broglie waves, m_k is the effective mass of an electron in the k-layer, $\gamma_k(E)=\sqrt{2m_k(E-U_k)}/\hbar$.

The boundary conditions for such structures can be written as

$$\begin{cases}\psi_k(z_k)=\psi_{k+1}(z_{k+1}),\\ \dfrac{1}{m_k}\dfrac{\partial\psi_k}{\partial z}(z_k)=\dfrac{1}{m_{k+1}}\dfrac{\partial\psi_{k+1}}{\partial z}(z_{k+1})\end{cases} \tag{3}$$

Substituting the general solution (2) into these boundary conditions, we obtain a system of algebraic equations with respect to A_k, B_k. Then, solving the resulting system, we obtain

$$\begin{cases}A_{k+1}=\dfrac{A_k}{2}\left(1+\dfrac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1}m_k}\right)e^{-i(\gamma_{k+1}-\gamma_k)z_k}+\dfrac{B_k}{2}\left(1-\dfrac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1}m_k}\right)e^{-i(\gamma_{k+1}+\gamma_k)z_k},\\ B_{k+1}=\dfrac{A_k}{2}\left(1-\dfrac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1}m_k}\right)e^{i(\gamma_{k+1}+\gamma_k)z_k}+\dfrac{B_k}{2}\left(1+\dfrac{\gamma_k m_{k+1}}{\gamma_{k+1}m_k}\right)e^{i(\gamma_{k+1}-\gamma_k)z_k}\end{cases} \tag{4}$$

A program for computer modeling of physical processes in the above-mentioned multilayer structures, in particular, in two-layer, three-layer and four-layer structures [4], was created in Visual Basic and MatLab. The program allows one to enter and change the number of layers (N), the effective mass of an electron (m_k), the height (U_k) and the width of the potential barrier (d_k) in each layer. The calculation results are transferred to MS Excel and are used to construct graphs. For example, in Fig. 1 shows the dependences of the probabilities of finding an electron on the energy and coordinate in two-, three- and four-layer structures ($d_1=d_2=d_3=d_4=2$ nm, $U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV, $U_3=0.39$ eV, $U_4=0.49$ eV) without and with the application of an electric field U_E=0.1 eV to the 1st, 2nd, 3rd and 4th layers.

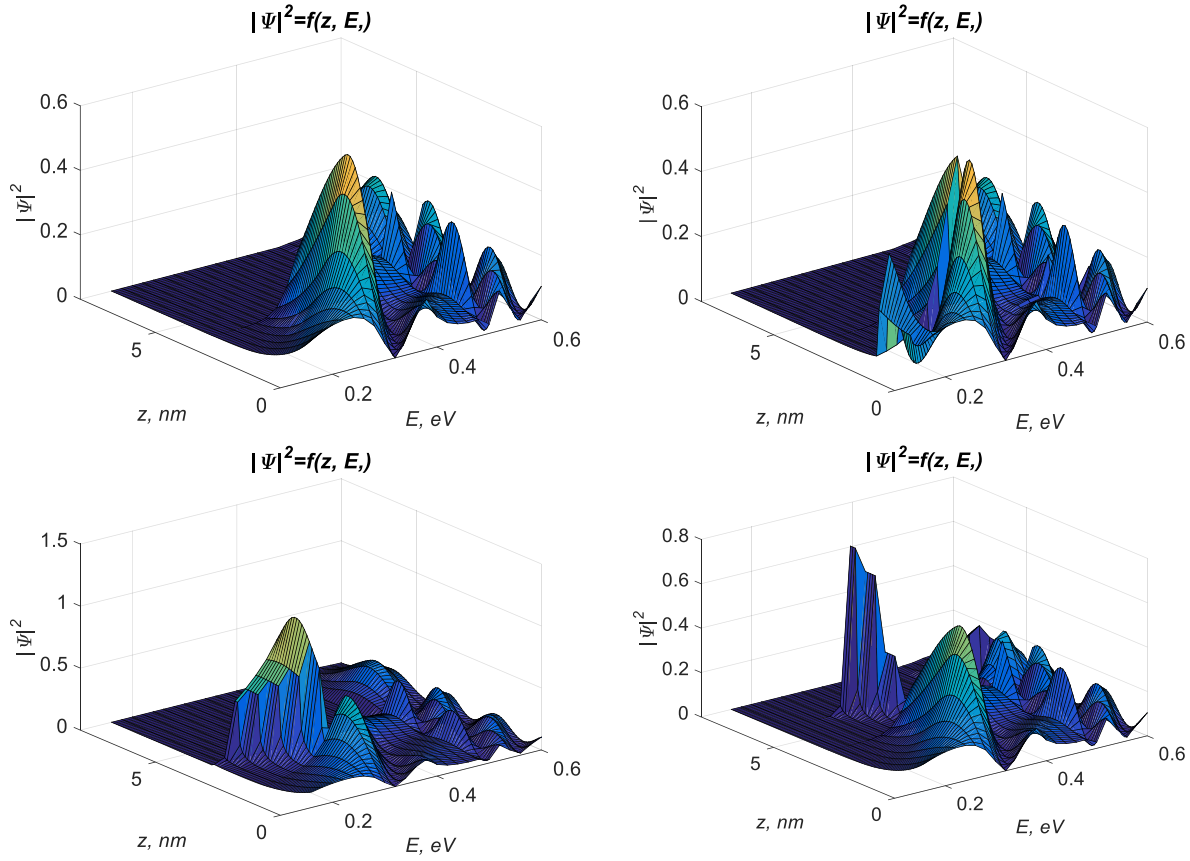


Fig. 1. Dependences of the electron detection probabilities on the energy and coordinate in four-layer structures ($d_1=d_2=d_3=d_4=2$ nm, $U_1=0.19$ eV, $U_2=0.29$ eV, $U_3=0.39$ eV, $U_4=0.49$ eV) without an electric field (a) and with the application of an electric field $U_E=0.1$ eV to layers 1 (b), 2 (c) and 3 (d).

When studying the effect of an electric field on two-, three- and four-layer structures, it was found that in the absence of an electric field, the probability of finding an electron near the point (0.32 eV, 1.9 nm) is the highest when the electric field is applied to the 1st layer, at the point (E = 0.18 eV, 1.9 nm) the probability of finding an electron appears an additional maximum and the maxima at the point (E = 0.32 eV, 1.9 nm) are divided into two, when the electric field is applied to the 2nd layer, the maximum at the point (0.28 eV, 3.1 nm) increases sharply and when the electric field is applied to the 3rd layer, the probability of finding electrons near the point (0.32 eV, 5.7 nm) increases, and when the electric field is applied to the 4th layer, its effect was not noticeable.

The developed software system and the results obtained with its help can be used for designing and optimizing the design parameters of semiconductor multilayer quantum nanostructures.

REFERENCES

1. L. D. Landau, E. M. Lifshitz Theoretical Physics: Quantum Mechanics (Nonrelativistic Theory). Vol.3, Stereot., 2021, 800 p., ISBN 978-5-9221-0530-9.
2. M. Nosirov, S.Matboboyeva, R.Aliev The influence of electric field on the motion of electrons in multilayer quantum nanostructures // Electronic Materials Processing, 2025, № 61(1), c.65–72. ; Surface Engineering and Applied Electrochemistry. https://www.pleiades.online/en/journal/surfeng.
3. M. Nosirov, S. Matboboyeva, S. Janibekova Simulation of electron movement in quantum nanostructures //Science and innovation international scientific journal, 2023, v. 2, № 12, pp.296-301 https://doi.org/10.5281/ zenodo.104332606.

AUTONOMOUS HYBRID MICROPOWER STATION FOR USERS IN WARM CLIMATIC REGIONS

E. A. Goipov

Andijan State University
129 University str., Andijan City, Uzbekistan,170100
Тел: (90) 211 41 69. E-mail: 2251717elmurod@mail.ru

Low water pressure limits micro-hydro plants. A hydro-photo hybrid system with rotating solar panels boosts turbine efficiency by 7–8% and cools panels, ensuring stable power for rural areas.

Key words: *Hybrid energy system, solar photovoltaic, micro-hydro turbine, efficiency, COMSOL simulation.*

ORCID: 0000-0001-7500-3167

This study unveils a hybrid micro-energy system merging a solar photovoltaic (PV) module with a micro-hydroelectric power plant to tackle low water pressure and inadequate power generation in off-grid rural areas. The design incorporates a rotating PV module, configured as a truncated hexagonal pyramid, affixed to the jet hydro turbine's shaft to boost the moment of inertia and elevate turbine efficiency. Simulations using COMSOL Multiphysics demonstrate a 7–8% efficiency gain for the hydro-turbine in low-power scenarios, while rotation-induced cooling preserves solar panel performance. Panel temperatures spanned 28–58.6°C at 2–8 rad/s rotation speeds, curbing efficiency drops in hot climates. This hybrid setup provides a versatile, scalable option for sustainable energy in rural urbanization.

Rising electricity needs in rural and suburban zones, fueled by urbanization, demand creative renewable energy approaches. Micro-hydroelectric plants suit water-rich areas, yet low-pressure conditions (2–5 meters) often hinder output. Likewise, solar panels lose efficiency from overheating in warm regions. This research proposes a hydro-photo hybrid micro-energy system, pairing a micro-hydro turbine with a rotating PV module to enhance efficiency via cooling and inertia gains. The paper outlines the system's design, methods, and performance, emphasizing its role in decentralized energy solutions.

The hybrid setup includes a micro-hydroelectric plant with a jet turbine (impeller: 600 mm, flow: 0.2 m^3/s, power: 3 kW) and a PV module of six silicon panels in a truncated hexagonal pyramid (power: 1 kW, efficiency: 20%). Mounted on the turbine shaft (rotating at 2–8 rad/s), it links to a battery and control unit. COMSOL Multiphysics simulations, using Multibody Dynamics and Heat Transfer interfaces, modeled performance under ASHRAE-derived hot climate conditions (10:00–16:00), evaluating temperature, efficiency, and stability metrics.

The hybrid system successfully controlled the solar panel's surface temperature, maintaining it within an ideal range, as shown by the numerical simulations. While uncooled panels attained temperatures of 80°C to 85°C during peak daylight hours, the average surface temperature of the panel stayed between 53°C and 56°C when running at a rotation speed of 2 rad/s. The efficiency of the panel was greatly increased by this temperature drop. The study also examined how rotational motion caused the solar panel to move out of its equilibrium position. The study also examined how rotational motion caused the solar panel to move out of its equilibrium position. The largest angular deviation at 8 rad/s was 6 degrees, and the displacement from the rotating centre was 0.04 meters. The vibration amplitude ranged from 0.0001 to 0.00022 meters at rotation rates of 3–4 rad/s and from 0.0006 to 0.0018 meters at 8 rad/s. It was found that 67 W of energy was needed to keep the panel rotating, which accounted for 24% of the energy that the panel lost to heating.

Conclusion

This hybrid solar-hydro system promises reliable decentralized power for low-pressure, high-solar regions, boosting turbine efficiency by 7–8% and maintaining PV output via cooling. Stable at 3–4 rad/s, it's scalable for rural grids. Future work should refine larger prototypes and minimize equilibrium shifts, enhancing its role in sustainable urban growth.

REFERENCES

1. Bozarov, O., et al. (2023). Hybrid solar-hydro autonomous energy system. Uzbekbekgidroenergetika Journal, 4(20), 49–53.
2. Prasetyo, S.D., et al. (2023). Hybrid PV/T collector system for sustainable energy harvest. Heliyon, 9, e13390.
3. Rajkumar, S., et al. (2020). Enhancing PV panel cooling using converging ducts. IET Renewable Power Generation, 14(2), 263–269.
4. ASHRAE Meteorological Database (accessed via COMSOL Multiphysics 6.1).

PREPARATION OF MICRO-SIZED GRANULAR ZN-SB COMPOUND.

Utkirbek Akhmadaliev

Andijan State Technical Institute
phone: (+99894) 109-12-11, gmail: keenjon7@gmail.com

Abstract: *This article analyzes the technology of preparing a Zn-Sb compound prepared by powder technology and methods of obtaining thermoelectric materials by heating and bonding with a resistance device. A mechanical method is used to prepare a semiconductor Zn-Sb compound, in which zinc-antimony particles are placed in a ceramic container, ground to a micron nanoscale, and then placed in a special ceramic cylindrical tube, heated and thermally treated in several stages. One of the most important factors in obtaining the thermoelectric parameters of this compound is the degree of grinding of the powder.*

Key words: *powder technology, micro and nanoscale, thermoelectricity, resistance heating, microphotography, granular thermal conductivity.*

ORCID: 0009-0000-9498-396

Today, there are several methods for obtaining thermoelectric materials, in particular, the preparation of Zn-Sb-based thermoelectric materials can be obtained in general, in a vacuum or in an inert gas-protected environment, based on technologies such as melting, refining, alloying and pressing the initial alloy. The method we propose is called the powder technology method and differs from other types of technologies, such as sol-gel or casting methods for obtaining thermoelectric materials, and in that it is simpler than other technologies, does not require complex technological processes. Since the process of pulverizing crystals using traditional powder technology is carried out by mechanical methods, impurities introduced by the external environment lead to the formation of various defects in the volume or surface of the material. [1-2]. There are many methods for preparing and measuring semiconductor thermoelectric materials, particularly the ZnSb semiconductor intermetallic compound, and the currently widespread and highly efficient powder technology is of great importance. In the method, we propose, a mixture of semiconductor ZnSb particles with a certain shape, weighed until they reach a powdery state, is prepared using 70% ethyl alcohol, and they are placed on a heat-resistant base, for example, a ceramic tube with an inner diameter of 1 millimeter, and pressed together on both sides with metal rods acting as ohmic contacts. Then, by heating and bonding the particles at temperatures close to the melting temperature of the ZnSb compound, T=400-600 ℃, a rod-shaped ZnSb polycrystal with a diameter of 1 millimeter is formed. Figure 1 shows a micrograph of Zn-Sb intermetallic compound powders obtained using powder technology. The studies were conducted using a 1600X 2MP digital microscope. The studies show that the size of Zn-Sb intermetallic compound powders is determined to be d~10÷50 μm. It is known from powder technology that the pulverization process is carried out mechanically. The thermal treatment process is carried out at temperatures below the melting temperature of the material, T~10÷50%.[3-4].

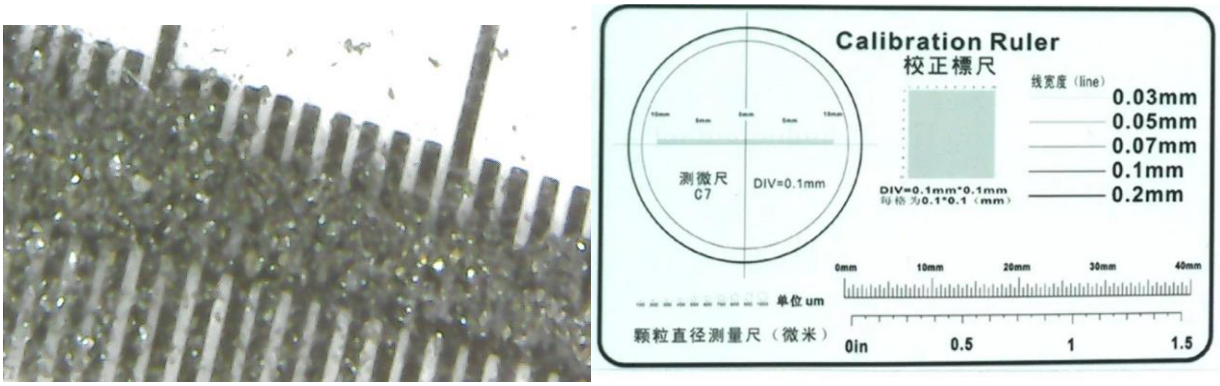


Fig. Micrograph of granulated ZnSb particles.

REFERENCES

1. Patent FAP20190154 25.02.2021. Granulalangan yarimo‘tkazgichli termoelektrik materiallar tayyorlash usuli Olimov L.O., Anorboev I.I., Mamirov A., Omonboev F.L., Omonboeva M.L.
2. L.O. Olimov, I.I. Anarboyev, A.M. Mamirov Granullangan yarimo‘tkazgichli termoelektrik materiallar tayyorlash usuli // Uzbekistan Respubliki Fanlar akademyasining maruzalari // 2020. №4, bet.20 -24. (№7).
3. M.I .Fedorov , LV Prokofeva , D.A Pshenay-Severin, A.A.Shabaldin va P.P. Konstantinov., New
1. Interest in Intermetallic Compound ZnSb, Journal of Electronics Materials. 43, P. 2314–2319 (2014).
4. Bagaev A.A., Bagaev A.I., Kulikova L.V. Electrotechnology: a textbook. Barnaul, ASAU Publ., 2006, 320 p.

PREPARATION AND ELECTROPHYSICAL STUDY OF VARISONIC SOLID SOLUTIONS $(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$

A.Sh.Razzokov, D.E.Koshchanova, R.M.Otajonova

Urgench State University, 14 Kh.Alimdzhan St., Urgench, Uzbekistan, 220100
phone: +998977925470, e-mail: a.razzokov777.@gmail.com

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used based on the study of physical and chemical properties of low-boiling working bodies and their cost.

Key words: *solid solutions, electrophysical properties, crystal growth, epitaxial layer.*

ORCID: [1]https://orcid.org/ 0000-0002-2210-6207

Abstract. At present, obtaining solid solutions possessing specific photovoltaic and electrophysical properties with extended physical capabilities based on elementary, binary semiconductors is an urgent task in the field of crystal growth [1-3]. Solid solutions $(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ were obtained from lead and bismuth melt solutions at the temperature of the beginning of crystallization, respectively, 860-760 ^{0}C (Pb), 650-600 ^{0}C (Bi). The cooling rate of the melt solution was 1-1.5/min and the gap between the substrates was in the range of 0.5-1.5 mm. Single-crystal GaAs substrates with orientation (100), with n-type conductivity, with a deviation from the plane not exceeding 15' - 30' were used as substrates. The concentration of charge carriers and the concentration of acceptor centers are determined.

The composition and structure of the obtained solid solutions were studied using XRD method and scanning electron microscope (SEM), which showed the monocrystallinity of the films and the presence of Ge, Ga and As components in the composition.

In a varison film, it is more difficult to determine the participating current carriers associated with impurity and other centers in the crystal lattice than in elementary semiconductor materials.

Therefore, in this work, we proposed a new approach to determine the concentration of the main charge carriers and impurity centres in the solid solution $(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ considering the variable parameters of the solid solution depending on the composition.

The concentration and mobility of charge carriers in the solid solution $(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x$ have been experimentally determined:

$$n_p = 1{,}5 \cdot 10^{18} sm^{-3}; \mu = 80\frac{m^2}{s \cdot V};\ (\mathrm{T} = 300\ \mathrm{K}).$$

The total concentration of acceptor centres and concentration of acceptor centres involved in current flow at T=300K, possible participating holes of impurity level at T>300K of varison solid solutions:

$$(Ge_2)_{1-x}(GaAs)_x: n_p = 1.5 \cdot 10^{18} sm^{-3}, n_p = 2.187 \cdot 10^{18} sm^{-3}\ n_з = 6.87 \cdot 10^{17} sm^{-3}$$

This work demonstrates the possibility of obtaining crystalline-perfect graded-gap epitaxial layers $(\mathrm{Ge_2})_{1-\mathrm{x}}(\mathrm{GaAs})_{\mathrm{x}}$ from a limited solution-melt by varying the chemical composition of the film. The electrical properties of the film and the band diagram of the $\mathrm{GaAs} - (\mathrm{Ge_2})_{1-\mathrm{x}}(\mathrm{GaAs})_{\mathrm{x}}$ structures are presented. A mechanism has been established for the relaxation time of charge carriers in the film, which are associated with ionized, neutral impurity atoms, dislocation centers and thermal vibrations in the crystal lattice. The solid solution $(\mathrm{Ge_2})_{1-\mathrm{x}}(\mathrm{GaAs})_{\mathrm{x}}$ is a promising semiconductor material in semiconductor device engineering.

REFERENCES

1. A.G.Rodríguez, H.Navarro-Contreras, M.A.Vidal. Long-range order–disorder transition in (GaAs)1−x(Ge2)x grown on GaAs(001) and GaAs(111). Microelectronics Journal. Chap.31, Iss.6, 2000, P.439-441.
2. B. Salazar-Hernández, M.A. Vidal, M.E. Constantino, H. Navarro-Contreras, R. Asomoza, A. Merkulov. Structural study of metastable (GaAs)1−x(Ge2)x thin films grown by RF magnetron sputtering. Journal of Crystal Growth. Chap.197, Iss.4, 1999, P.783-788. https://doi.org/10.1016/S0022-0248(98)00958-0.
3. M. Milanova, P. Terziyska. Low-temperature liquid-phase epitaxy growth from Ga–As–Bi solution. Thin Solid Films.Chap.500, Iss.1–2, 2006, P.15-18 https://doi.org/10.1016/j.tsf.2005.10.049.

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE OF DIFFERENT TYPES OF GENERATORS IN A LOW-TEMPERATURE ORC SYSTEM

Andrzej Grzebielec[1], Adam Szelągowski[2], Paweł Szostak

Faculty of Power and Aeronautical Engineering, Warsaw University of Technology,
24 Nowowiejska str., Warsaw, Poland, 00-665
phone: (048) 602 277 873, e-mail: andrzej.grzebielec@pw.edu.pl

ORC (Organic Rankine Cycle) is a device that employs a working fluid other than water. Its proper functioning depends on selecting components like the condenser, evaporator, regenerator, pump, and expander. The choice of the electrical generator is also crucial for the device's operation. This article presents study results on a system that was tested with several different generators. Tests were conducted with and without the regenerator, showing that no single configuration achieves optimal performance under all conditions.

Key words: *Organic Rankine Cycle, ORC, heat recovery, electric generator, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0003-3320-5929; [2]0000-0003-1017-1949

Organic Rankine Cycle (ORC) systems convert low-grade thermal energy into mechanical work or electricity using organic working fluids with low boiling points. These systems are commonly used in waste heat recovery, geothermal energy, and solar power applications. In the analyzed ORC system, isobutane (R600a) serves as the working fluid, with an oil-fired boiler as the heat source and an AC unit as the heat sink. The working fluid undergoes phase change in the evaporator, flows through the regenerator, and expands in an expander connected to an electric generator. Valves allow for the inclusion or exclusion of the regenerator. After expansion, the fluid condenses and is pumped back to the evaporator. The system operates with condensation and evaporation temperatures of 20°C and 80°C, respectively.

The selection of a working fluid is crucial for the efficiency, safety, and applicability of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. These fluids are chosen based on factors such as boiling point, thermal stability, environmental impact, and compatibility with system components. Common ORC working fluids include hydrocarbons like isobutane (R600a), propane (R290), and pentane (R601), which are effective in low-temperature applications but require safety measures due to flammability. Synthetic refrigerants such as R245fa and R134a offer stability and compatibility, with newer low-GWP options meeting environmental regulations. Siloxanes like MM are used in high-temperature applications due to their thermal stability, while aromatic hydrocarbons such as toluene and benzene are suitable for high-temperature systems but pose toxicity concerns. Alcohols like methanol and ethanol are occasionally used but have limitations related to flammability and corrosion. Considering environmental and regulatory factors, R600a was selected as the working fluid due to its low global warming potential (GWP) and ozone depletion potential (ODP), making it a sustainable and energy-efficient choice.

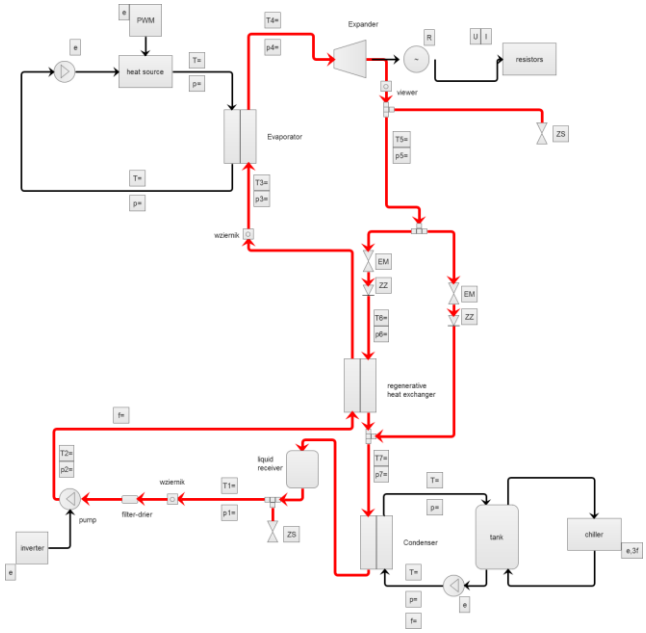


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental setup

The schematic diagram (Fig. 1) illustrates the investigated Organic Rankine Cycle (ORC) system, detailing key components and measurement points essential for performance monitoring. It includes the heat source, evaporator, expander, condenser, regenerative heat exchanger, and liquid receiver, with strategically placed sensors for temperature (T), pressure (p), and flow rate (f). Additional system elements such as the pump, filter-drier, and electrical resistors for energy dissipation are also depicted. Critical control components, including check valves (ZS) and solenoid valves (EM), ensure precise regulation. The system is designed for experimental analysis, enabling the evaluation of ORC efficiency and thermodynamic performance under various operating conditions.

The study analyzed the performance of a system equipped with different generators under varying configurations, focusing on power output and efficiency. Tests were conducted with and without heat recovery, revealing a trade-off between power generation and efficiency. The system initially operated with a lower-capacity generator, achieving stable efficiency but limited power output. When the regenerator was removed, power generation increased significantly, though efficiency declined. A higher-capacity generator was then introduced, leading to improved power output but requiring careful adjustment of operational parameters. However, when operating without a regenerator, this generator showed a noticeable drop in both power and efficiency. The results emphasize the importance of optimizing system configurations to balance power generation and efficiency based on specific operational objectives.

Acknowledgment

The study was financed by the National Centre for Research and Development (Poland) in the framework of the grant No MAZOWSZE/0181/19.

REFERENCES

1. M. Asim, S. Khan, S. Ali Khan, T. Baig, M. Imran, A. W. Zia, F. Riaz, M. K. Leung, „Thermal analysis and optimal fluid selection for the novel integrated vapor compression cycle and ORC system for ultra-low grade waste heat recovery using the desuperheating method," Energy Nexus, tom 17, 2025.
2. M. Bahrami, . F. Pourfayaz, A. Kasaeian, „Low global warming potential (GWP) working fluids (WFs) for Organic Rankine Cycle (ORC) applications," Energy Reports, tom 8, 2022.
3. G. Cammi , C. C. Conti, S. Andrea, A. Guardone, „Experimental characterization of nozzle flow expansions of siloxane MM for ORC turbines applications," Energy 218, 2021.
4. X. Dai, L. Shi, Q. An, W. Qian, „Screening of hydrocarbons as supercritical ORCs working fluids by thermal stability," Energy Conversion and Management, tom 126, pp. 632-637, 2016.
5. S. Damarseckin, S. Y. Junior Kane, A. Atiz, M. Karakilcik, H. Sogukpinar, I. Bozkurt, S. Oyucu, A. Aksoz, „ A comparative review of ORC and R-ORC technologies in terms of energy, exergy, and economic performance", Heliyon 10 (23) 2024.
6. A. Grzebielec, A. Szelągowski, P. Łapka Ł. Cieslikiewicz, M. Seredyński, „The use of a genetic algorithm to determine the optimal operating conditions for a low-temperature orc system", 12th ICEE SELECTED PAPERS, 2023, Wilno, Litwa, Vilnius Gediminas Technical University.
7. A. Grzebielec, A. Szelągowski, Ł. Cieslikiewicz, P. Łapka, M. Seredyński, „Experimental study of the ORC system with isobutane (R600a) as a working fluid" 11. European Conference on Renewable Energy Systems Ecres 2023. Proceedings, 2023, Riga, 2023.
8. P. Lykas, K. Atsonios, A. Gkountas, P. Bakalis, D. Manolakos, P. Grammelis, G. Itskos, N. Nikolopoulos, „Energy, exergy, and economic comparison of ORC with quasi-isothermal expansion with other ORC designs for low-grade waste heat recovery," Thermal Science and Engineering Progress, tom 55, 2024.
9. A. Szelągowski, K. Kwiatkowska, „Impact of Electric Generator Replacement on the Performance of an ORC System Using R600a as the Working Fluid", Modern Engineering 4(2024) 11-24.
10. X. Wu, L. Lin, L. Xie, J. Chen, L. Shan, „Fast robust optimization of ORC based on an artificial neural network for waste heat recovery," Energy, tom 301, 2024.

MODELING AND ANALYSIS OF LIGHTING SYSTEMS IN THE ROOM OF A BANK

Feven Abraham Asnake, Artur Rusowicz[1]

Warsaw University of Technology, Faculty of Power and Aeronautical Eng.
24 Nowowiejska str., Warsaw, Poland, 00665
phone: (048) 22-234-5221, e-mail: artur.rusowicz@pw.edu.pl

Key words: *lighting, energy efficiency, illumination, incandescent, fluorescent and LED lamps*

ORCID: [1]0000-0001-7949-6907.

Abstracts of conference reports

With the ever-increasing cost of energy worldwide, understanding and designing efficient lighting is becoming necessary for sustainable living in the modern world. Since Thomas Edison invented and developed commercially manufactured light bulbs in the 1880s, many types of light sources have been developed [1]. The earliest sources of lighting – the incandescent lamps – used a wire filament enclosed in a glass bulb in a vacuum, which heats until it glows. In these bulbs, less than 5% of the energy they consume is converted into visible light; the rest is lost as heat. As a result, over the years, many light sources have been developed to improve the efficiency of the light bulb. The three main categories of electric lights are incandescent lamps, which produce light by a filament heated white-hot by electric current, gas-discharge lamps, which produce light by means of an electric arc through a gas, such as fluorescent lamps [2,3], and LED lamps [4,5], which produce light by a flow of electrons across a band gap in a semiconductor [6]. These several types of bulbs have different characteristics in terms of parameters such as photometric measurements (lumen, lux. etc.), energy consumption, cost, environmental issues, and health effects. Since the invention of the light bulb, the variety and number of lighting equipment manufacturers have grown along with urbanization of cities [7,8]. Thus, in modern buildings, it is required to supply enough light with proper lighting distribution in space, with reasonable costs and minimal environmental impact [9,10]. Furthermore, in the 21st century, with the shift towards renewable energy, the importance of energy efficiency has greatly increased due to climate change. Thus, more efficient lighting offers potentially large savings in energy consumption.

The case study has been conducted in a commercial building in Poland. It is a three-floor building with one basement, ground floor and first floor. The total area of the building is 750 square meters. The building has 10 different types of rooms, and a total of 12 rooms. In this study, we will model and simulate the type of lamp that gives a suitable amount of illuminance (lux) for the specific purpose of the room and which saves the total power used, as well as the long-term effect of the site. Lighting systems in each building were broken into several groups based on their operational patterns and then numerically modeled with the aid of Python. The results of this case study show that 60% energy savings, totaling 350 MWh in a year, can be achieved by retrofitting fluorescent lights with LEDs and occupancy sensors. These energy savings translate to a reduction of 62.4 t of CO2 emissions per year. The results of our cost analysis in this model show that the LED light retrofit has a break-even point at 15 months of operation.

The bank is located on the ground floor of the building. The area for the Bank is 98.0 m2 and has a height of 2.8 m. The height of the work plane is 0.75 m, and the distance between the floor and the luminaire is 7.5 m. The reflection coefficient rates of the walls are ρ wall=0.5, floor ρ floor=0.2, and ρ ceiling=0.7. with required illuminance of 75 lux. Using relux software, I have selected the lux level for bank areas, the lux level is from 500 lx to 750 lx.

For the bank, we use three different scenarios by using three different lighting solutions in order to provide minimum light requirements for visual comfort and visual task according to ISO 8995-1:2002(E)/CIE S 008/E:2001 standard and also to obtain maximum energy optimization. In scenario 1, the Banking lot has been designed by using Philips, Cleanroom LED (CR434B W30L120_940) LED lamp. In scenario 2, the Bank has been designed by using Tulux, Wannenleuchte (135R15NE-K) fluorescent luminaire. In the third scenario, the Bank has been designed by using GEWISS, Tonda ES (GW80652) incandescent lamp. The building, where the experiment has been conducted, operates 7 days a week and 24 hours a day.

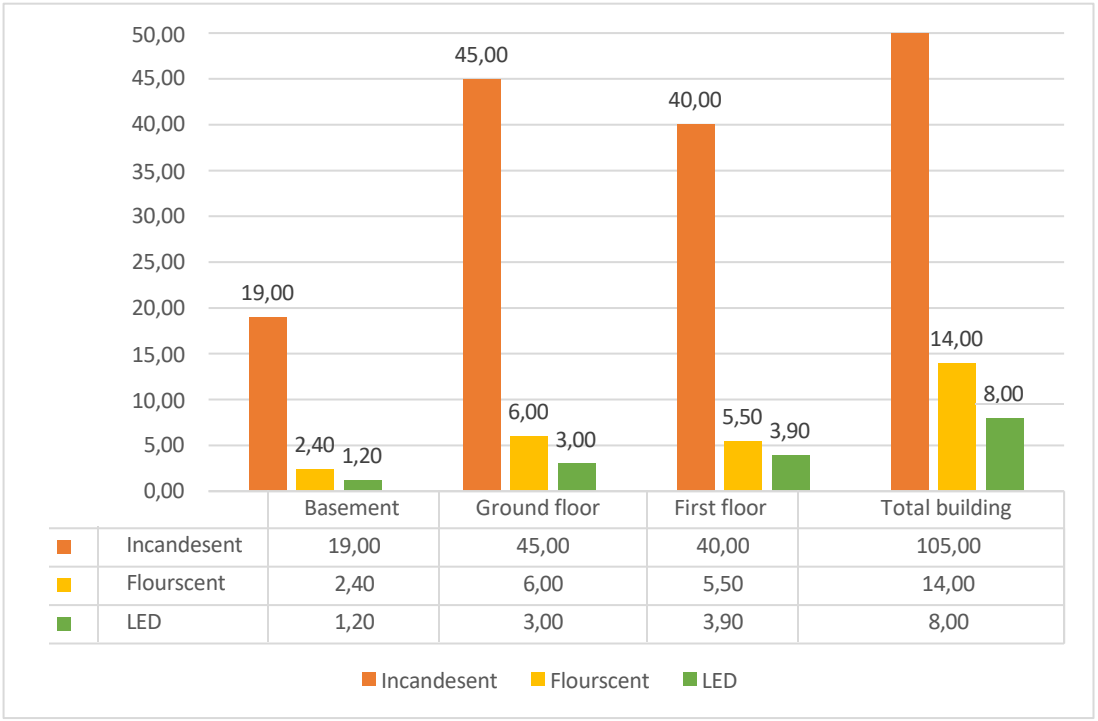
The lighting scheme for the study has been designed by using Relux simulation software and the simulation results are presented for each scenario.

Result

Proceeding from the above, the energy analysis was done for each scenario of LED, CFL and Incandescent bulbs, the energy equivalent for each type of lamp on the three-floor building was done, the energy per hour cost, cable sizing and breaker rating were also studied. I will discuss each scenario accordingly below.

As we have seen on the simulation of the bank, when we compare the three scenarios, the Incandescent lamps used 73 luminaries to give the total power of 7.9kW for the same lux level, the fluorescent lamps used 14 luminaries to give total power of 1.2kW and the LED luminaries used 9 lamps to give 0.975 kW luminaires. This shows us that when used in the same room with the same required lux levels, LED lamps use much less total power and number of lamps than Fluorescent and Incandescent lamps.

Below is a chart describing the total energy calculated for the whole building for all three types of lamps. It is summarized so that one can understand which portion of the energy at each step is higher or lower by type, and thereby compare them.



	Basement	Ground floor	First floor	Total building
Incandesent	19,00	45,00	40,00	105,00
Flourscent	2,40	6,00	5,50	14,00
LED	1,20	3,00	3,90	8,00

REFERENCES

1. J. Schleich, B. Mills and E. Dütschke 2014 A Brighter Future? Quantifying the Rebound Effect in Energy Efficient Lighting Elsevier 72, pp.35-42
2. W. M. Ng, D. Y. Lin and S. Y. Hui 2012 Design of a Single Ultra-Low-Loss Magnetic Ballast for a Wide Range of T5 High-Efficiency Fluorescent Lamps Ieee Transactions On Industrial Electronics, Vol. 59, No. 4, APRIL 2012
3. Aliskan and R. Keskin 2016 Fluorescent Lamp Modelling and Electronic Ballast Design by the Support of Root Placement International Journal of Engineering Technologies Vol.2, No.3, 2016
4. D. Zhu and C. J. Humphreys 2016 Solid-State Lighting Based on Light Emitting Diode Technology Optics in Our Time chapter 5 p 112
5. D. M. Babu, S. Regatti and S. G. Rao. 2013 An Electronic Ballast with U P F International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science Volume II, Issue IX pp 39-48
6. M. Cole, H. Clayton and K. Martin 2014 Solid State Lighting: The New Normal In Lighting Petroleum and Chemical Industry Conference (PCIC Brasil) pp 194-202
7. R. K. Pandey and Asst. Prof. S. P. Tondare 2016 An AC LED Driver with Improved Total Harmonic Distortion and Power Factor International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 7, Issue 5, May-2016
8. A. R. Musa, N. A. G. Abdullah, A. I. Che-Ania, N. M. Tawila and M. M. Tahira 2011 Procedia - Social and Behavioral Sciences UKM Teaching and Learning Congress 2011, vol. 60 pp. 318 – 324
9. V. Bogatishchev. 2014 Improving the Effectiveness of Industrial Lighting Metallurgist Vol 58
10. J. Lillo, H. Moreira, L. Álvaro and D. Majarín. 2013 Lighting and Work: Light for Seeing and Healthy Light Psyecology, 4:1 pp 11-38
https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text (date of application: 04.11.2021).

ANALYSIS OF AN R290 HEAT PUMP WITH A REGENERATOR BASED ON EXPERIMENTAL DATA

Katarzyna Katana[1], Andrzej Grzebielec[2]

Warsaw University of Technology, Institute of Heat Engineering,
21/25 Nowowiejska str., Warsaw, Poland, 00-665
phone: +48 (22) 234-52-32, e-mail: andrzej.grzebielec@pw.edu.pl

This study presents experimental data on an R290 heat pump with a ceramic regenerator. This solution addresses the issue of high CO2 levels in indoor environments and proposes a more energy-efficient and environmentally sustainable method of heating.

Key words: *heat pump, R290, propane, ceramic regenerator.*

ORCID: 10009-0000-2007-2456, 20000-0003-3320-5929

Introduction

There is a growing need for modern heating, cooling, and ventilation systems that are both efficient and environmentally friendly. Many traditional refrigerants have a high Global Warming Potential (GWP), contributing to climate change, therefore new solutions must focus on reducing their impact. Proper ventilation is essential—high CO_2 levels indoors can negatively affect people, lowering concentration, causing fatigue, headaches and drowsiness. Carbon dioxide exposure below 5000 ppm impacts human cognitive performance, especially complex cognitive tasks. School-aged children exhibit a slight decrease in simple task accuracy when exposed to CO2 concentrations of 1500–3000 ppm. In workplaces that require high cognitive demands, such as schools, universities, offices etc., the CO2 limit should be no greater than 1000 ppm [1]. An innovative monoblock R290 heat pump with a ceramic regenerator addresses these issues.

Method

R290 (propane) is a natural refrigerant from the hydrocarbon group. It has a GWP of just 3 and good thermodynamic properties. However, its flammability necessitates additional safety measures such as a mass refrigerant limit. It can be calculated based on a norm: EN 378-1+A1 [2]. A basic heat pump consists of four elements: condenser, compressor, evaporator and an expansion valve (TEV). To enhance energy efficiency, a ceramic regenerator has been placed between an outside heat exchanger (evaporator) and a fan. This device operates in two phases: air supply and air exhaust. During the air exhaust phase, warm air with a high CO2 concentration is drawn from the ventilated room, through the condenser, regenerator and the evaporator and then expelled outside. Additionally, this process regenerates the ceramic blocks, which then function as heat storage. During the air supply phase, cold fresh air is drawn from the outside, and it follows the same path, absorbing stored heat from the regenerator. This system is equipped with a four-way valve, so it can work as a refrigeration device when needed. It also includes an inverter, high- and low-pressure switches, pressure transmitters and both temperature and relative humidity sensors.

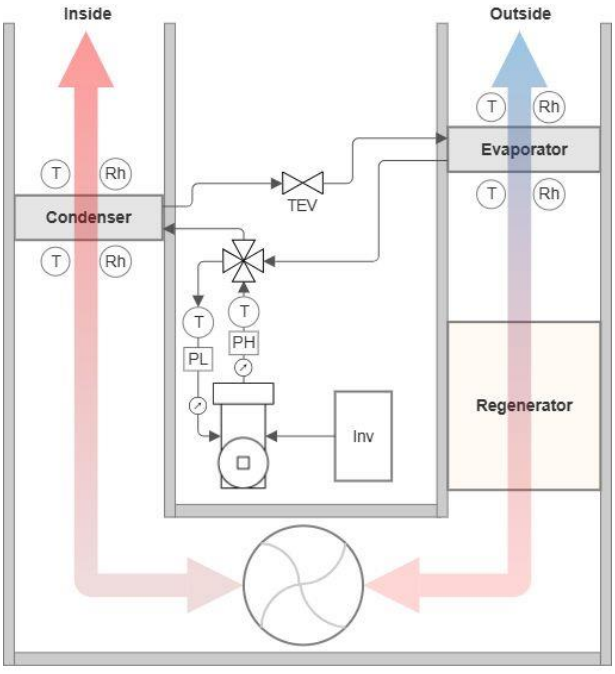


Figure 1. Heat pump with a ceramic regenerator and a two-sided flow

Results

Temperatures have been measured in 30-minute cycles on two separate days, one with an outside temperature of 0°C (Fig. 2) and other with a temperature of 5°C (Figure 3). The temperature labels are as follows (assume an air exhaust phase): T1 – after condenser (inside), T2 – before a condenser, T3 – before an evaporator (outside), T4 – after an evaporator, T5 – under the regenerator. In both cases, the ventilated room temperature was 18°C.

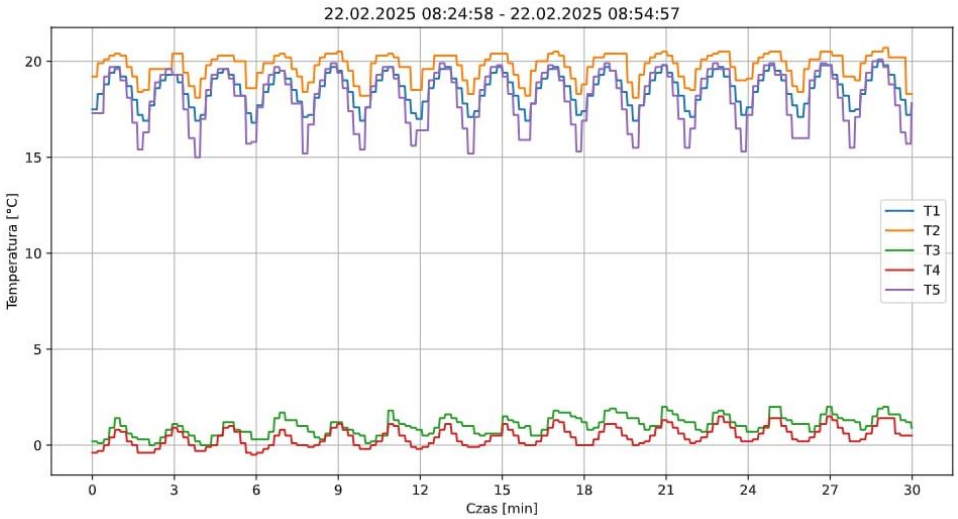


Figure 2. Temperature characteristics for 0 ℃ outside

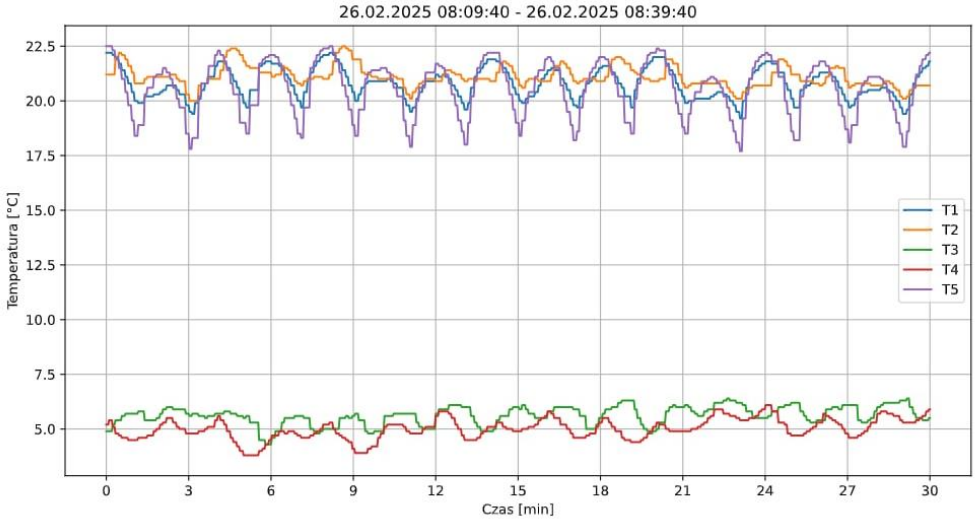


Figure 3. Temperature characteristics for 5 ℃ outside

The temperature supplied to the ventilated room is above 20°C when there is 5°C outside and slightly below 20°C when the outside temperature approaches a freezing point. The air supply rate is 1400 $\frac{m^3}{h}$ during the air exhaust phase and 1400 $\frac{m^3}{h}$ during the air supply phase. The COP (Coefficient of Performance) is around 4.

REFERENCES

1. Y. Fan, X. Cao, J. Zhang, D. Lai i L. Pang, „Short-term exposure to indoor carbon dioxide and cognitive task performance: A systematic review and meta-analysis," Building and Environment vol. 237, 1 June 2023.
2. European Committee for Standardization, EN 378-1+A1: Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements – Part 1: Definitions, classification, and safety criteria, 2016, section 4.3, "Mass Limit of Flammable Refrigerants."

УДК 504.062.2; 697.975

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА ДЛЯ ОДНОЧАСНОГО ОТРИМАННЯ ТЕПЛОТИ І ХОЛОДУ НА ФАРМАЦЕВТИЧНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ

І. В. Перепелиця[1], О. В. Зур'ян[2]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна

Досліджена ефективність використання теплового насоса для одночасного отримання теплоти і холоду на фармацевтичному підприємстві з метою зниження енергетичних витрат. Запропонована схема, де джерелом теплоти є холодильна мережа з постійними параметрами, що забезпечує стабільність температурних режимів, необхідних для технологічних процесів та зберігання продукції. Проаналізовано економічну доцільність використання теплового насоса у порівнянні з такою технологію, як FreeCooling, у різні періоди доби. Особливу увагу приділено автоматичному регулюванню роботи системи через SCADA-систему, що мінімізує людський фактор і гарантує безперервне підтримання необхідних умов. З урахуванням вимог фармацевтичного виробництва, включаючи необхідність дотримання строгих температурних параметрів, вибрано тепловий насос "вода-вода". Така схема дозволяє ефективно використовувати енергію між системами холодо- та теплозабезпечення, що забезпечує стабільність кліматичних умов у виробничих та складських приміщеннях. У періоди простою тепловий насос підтримує необхідну температуру в холодильній мережі, запобігаючи використанню енергоємних холодильних машин. Це рішення підвищує енергоефективність, зменшує експлуатаційні витрати та відповідає вимогам належної виробничої практики.

Ключові слова: *відновлювана енергетика, FreeCooling, тепловий насос, холодильна машина, утилізація теплоти.*

ORCID: [1]0009-0000-9724-8368; [2]0000-0002-2391-1611

FEATURES OF USING A HEAT PUMP FOR SIMULTANEOUS HEAT AND COLD PRODUCTION AT A PHARMACEUTICAL ENTERPRISE

I. Perepelytsia[1], O. Zurian[2]

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine

There was investigated the efficiency of using a heat pump to simultaneously generate heat and cold at a pharmaceutical enterprise in order to reduce energy costs. The proposed scheme, where the source of heat is a refrigeration network with constant parameters, ensures the stability of temperature conditions required for technological processes and product storage. The economic feasibility of using a heat pump in comparison with such a technology as freezing is analyzed at different periods of the day. Particular attention is paid to the automatic regulation of the system through the SCADA system, which minimizes the human factor and guarantees continuous maintenance of the required conditions. Taking into account the requirements of pharmaceutical production, including the need to comply with strict temperature parameters, a water-to-water heat pump was chosen. This scheme allows efficient use of energy between the cooling and heating systems, which ensures stable climate conditions in production and storage facilities. During periods of downtime, the heat pump maintains the required temperature in the refrigeration network, preventing the use of energy-intensive chillers. This solution increases energy efficiency, reduces operating costs, and meets the requirements of good manufacturing practice.

Keywords*: renewable energy, FreeCooling, heat pump, refrigeration machine, heat recovery.*

ORCID: [1]0009-0000-9724-8368; [2]0000-0002-2391-1611

Розвиток відновлюваної енергетики є ключовим напрямом у досягненні цілей сталого розвитку, включно зі зменшенням негативного впливу енергетичного сектору на довкілля та підвищенням енергоефективності виробництва.

Фармацевтичне виробництво вимагає високої точності в підтриманні кліматичних параметрів приміщень, що забезпечується одночасною роботою систем холодо- та теплозабезпечення. Основним джерелом холоду на таких підприємствах є потужні холодильні установки. Раціональне використання енергоресурсів у цьому процесі є критично важливим. Технологія FreeCooling дозволяє значно скоротити витрати на охолодження в холодний період року за допомогою зовнішніх кліматичних умов для охолодження без задіяння компресорних установок. Водночас теплозабезпечення фармацевтичних підприємств традиційно базується на використанні теплотехнічних пристроїв, що працюють на органічному паливі. Ефективним рішенням для оптимізації енергоспоживання є впровадження теплових насосів, які можуть використовувати контур холодозабезпечення як джерело тепла. Це дає змогу ефективно перерозподіляти енергію між системами та зменшувати споживання палива в опалювальних установках, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат та впливу на навколишнє середовище.

Зміни тарифів на енергоносії значно впливають на ефективність використання теплових насосів і систем FreeCooling. Для моделювання цього ефекту доцільно використовувати моделі, які враховують зміни тарифів протягом доби. Систему можна налаштувати в такий спосіб, щоб використовувати дешевшу енергію в періоди, коли тарифи на електроенергію чи газ низькі. Запропоноване рішення базується на використанні теплового насоса з джерелом теплоти у вигляді холодильної мережі, що дозволяє забезпечити безперервну всесезонну роботу системи відповідно до виробничих потреб. Дослідження спрямоване на визначення оптимального співвідношення між технологіями FreeCooling і теплового насоса для максимального зниження витрат, підвищення прибутковості залежно від тарифів на енергоносії та автоматизації процесів за допомогою SCADA-системи.

Слід зазначити, що за замовчуванням всі теплові насоси ідуть у виконанні автоматичного контролю температури отриманого теплоносія, вважаючи, що джерело тепла умовно безкінечне. Це призводило до того, що під час добових коливань температури в тепловій мережі і за граничних її значень тепловий насос розвантажував роботу компресорів (працював на 50 % потужності) або зупинявся після досягнення заданої температури. Було прийнято рішення «Перевернути схему керування» перебудувати схему автоматики, перемістити точку контролю зі споживача тепла на джерело. Таким чином, автоматика почала контролювати температуру холодного контуру, вважаючи споживача теплоти умовно безкінечним. У зимовий період за температури парів фреону нижче температури теплоносія в мережі для запобігання аварійних зупинок по температурі конденсації, керування цим параметром перекладено на зовнішню SCADA, що дозволяє або забороняє роботу теплового насоса. Оскільки в системі холодозабезпечення споживання холоду постійно більше потужності теплового насоса, він постійно працює з навантаженням 100 %, а все тепло передає в систему теплозабезпечення. Це дозволило виключити частковий режим навантаження та використовувати тепловий насос з максимальною продуктивністю.

Однією з важливих особливостей системи теплових насосів є можливість автоматизації їх роботи залежно від змін тарифів на електроенергію та природний газ. За допомогою сучасних систем управління, таких як SCADA, можна автоматично регулювати графік роботи теплового насоса, що дозволяє значно знизити витрати на енергоносії. Програмне забезпечення SCADA дає змогу здійснювати моніторинг та аналіз споживаної енергії, а також прогнозувати витрати в охолодженні та опаленні на наступний день. Диспетчерське управління в реальному часі, збір даних, обробки, відображення й архівування інформації та керування SCADA всією розглянутою системою холодозабезпечення відбувається за допомогою програмного продукту від компанії Siemens – Desigo CC.

Тариф на електроенергію змінюється щогодини і для промислового підприємства в Україні може бути значним, залежно від багатьох факторів. Середня ціна для компанії з урахуванням передачі та розподілу за лютий – 8,07 грн/кВтг без ПДВ. При цьому мінімальна ціна РДН без урахування передачі та розподілу за лютий становила 0,5 грн/кВтг, максимальна ціна становила 10 грн/кВтг. Ціна відрізняється більше ніж в 10 разів. Особливо сильно ціна відрізняється в період весна-осінь, що обумовлено сонячною генерацією.

Тариф природного газу визначається один раз на місяць на контрактній основі. За підсумками лютого 2025 року вартість 1 $м^3$ газу становить 16,97 грн без ПДВ.

Програмне забезпечення Desigo CC, через проміжну базу даних, дозволяє автоматично отримати з сайту оператора ринку електричної енергії прогноз тарифу РДН та вартість природного газу на поточний період. Дані про тарифи дають змогу виконати розрахунок коефіцієнтів співвідношення та спрогнозувати графік роботи теплового насоса на поточний та наступний день.

На прикладі відеосторінки SCADA від 20.02.2025 (рис. 1) видно, що часовий проміжок між 0:00 і 17:00 та 22:00 і 24:00 має позитивне співвідношення між тарифом природного газу та електроенергії, тому алгоритм системи дозволяє роботу теплового насоса, що позначається зеленим кружечком поряд з тарифом електроенергії. У період з 17:00 до 22:00, коли співвідношення вартості природного газу і електроенергії є збитковим, запрограмований алгоритм не дає команду на роботу тепловому насосу. На відеосторінці цей період позначений сірими кружечками.

Після завершення доби дані автоматично оновлюються з розрахунком графіка роботи теплового насоса залежно від тарифів РДН та вартості природного газу.

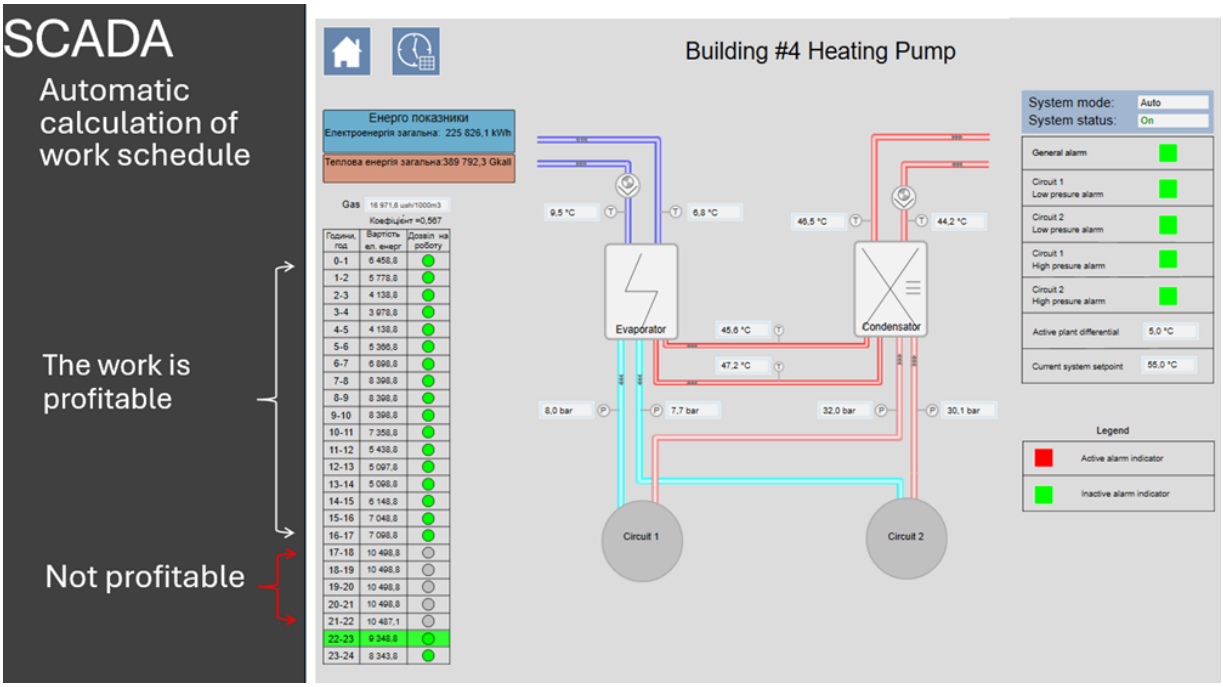


Рис. 1. Сторінка SCADA Decigo CC зі структурною схемою роботи теплового насоса Aermec, Модель WRK0350HL та автоматичним плануванням графіка робіт залежно від тарифів

Згідно з розрахунком добового споживання електроенергії, виробництва холоду й теплоти в разі роботи теплового насоса в постійному режимі, тобто без урахування мінливості тарифів, економія від використання технології становить 881 ₴/добу. У разі роботи теплового насоса в адаптивному режимі з урахуванням співвідношення вартості енергоносіїв економія від використання технології становить 1024 ₴/добу. Таким чином (на прикладі 20.02.2025), рентабельність роботи теплового насоса підвищується на 16 % і забезпечує додаткових 143 ₴/добу. У масштабах року потенційний приріст рентабельності може становити 35–40 тис. грн.

Висновок:

Сучасні технології опалення та охолодження, як-от теплові насоси та системи FreeCooling, є важливим інструментом для підвищення енергоефективності фармацевтичних підприємств. Вони не тільки знижують витрати на паливо та електроенергію, але й допомагають зменшити негативний вплив виробництва на довкілля. Урахування змін тарифів на енергоносії та автоматизація роботи теплових насосів дозволяє значно підвищити економічну ефективність підприємства, що є важливим фактором у сучасних умовах конкурентного ринку.

ПОСИЛАННЯ

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії: Закон України від 15.02.2022 № 2046-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#n8 (дата звернення: 15.07.2022).
2. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 04.11.2021).
3. Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 29.11.2022 № 1592. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1592874-22#n2 (дата звернення: 04.03.2023).
4. Про затвердження Правил ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 307. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text (дата звернення: 04.11.2021).
5. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 308. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text (дата звернення: 03.09.2021).

6. Зур’ян О. В. Комплексне використання підземного акумулювання теплоти, теплонасосної системи та сонячних колекторів / О. В. Зур’ян. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. 2023. № 5(142). С. 94–102. https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.5.11

7. Кузнєцов М. П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія. /ІВЕ НАН України/. Київ. ІВЕ НАН України, 2022. 152 с. (Обл.-вид. арк. 8,1). ISBN 978-966-641-11. URL : https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Kuznetzov_monografy_PRINT.pdf

8. Перепелиця І. В., Зур’ян О. В. Прикладна методологія комплексного застосування технологій free cooling і тепловий насос. Відновлювана енергетика. 2024. № 1(76). С. 109–117. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).109-117

УДК 621.316.9

ON THE POSSIBILITY OF LEVERAGING DIGITAL VIDEO CAMERAS FOR LIGHTNING STRIKE DETECTION IN SMART GRID SYSTEMS

Y. Trotsenko[1], A. Harford[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

This paper presents an experimental system for capturing lightning strikes on transmission lines using digital video cameras, aimed at enhancing Smart Grid capabilities. With the data collected from the cameras, a transmission system operator can better identify vulnerabilities in the electric networks, such as areas that are frequently struck by lightning.

Key words: *smart grids, overhead transmission lines, lightning detection, digital video cameras.*

ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВИХ ВІДЕОКАМЕР ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ УДАРІВ БЛИСКАВКИ В СИСТЕМАХ SMART GRID

Є. О. Троценко[1], А. Г. Харфорд[2]

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

У цій роботі представлено експериментальну систему для відео реєстрації ударів блискавки у лінії електропередачі за допомогою цифрових відеокамер, спрямовану на розширення можливостей Smart Grid. Завдяки даним, зібраним з камер, оператор системи передачі електричної енергії може краще виявити вразливі місця в електричних мережах, наприклад, ділянки, які часто зазнають ударів блискавки.

Ключові слова: *розумні мережі, повітряні лінії електропередачі, виявлення блискавки, цифрові відеокамери.*

ORCID: [1]0000-0001-9379-0061; [2]0000-0002-9898-6474.

Capturing lightning flashes striking overhead transmission lines with digital video cameras can be quite useful for implementing the Smart Grid concept [1, 2]. Lightning strikes to transmission lines can cause faults or insulation flashovers, leading to power outages or equipment failure. With the data collected from the cameras, a transmission system operator (TSO) can better identify vulnerabilities in the transmission lines, such as areas that are frequently hit by lightning. This information can help inform decisions about improving grid resilience, such as reinforcing certain transmission lines, installing lightning arresters, or implementing other measures. Moreover, using cameras to observe lightning strikes helps in understanding the details of lightning attachment to the phase conductor [3].

The purpose of this work is to test an experimental system for capturing lightning strikes with common camcorders. The lightning detector setup was relatively straightforward, and utilized Agent DVRTM software [4], a laptop, and was tried with an assortment of cameras, ranging from webcams to smartphones. In particular, smartphones and webcams having shutter speeds of 30-60 fps were used. Both Wi-Fi and USB connections were utilized to experiment with different setups. The software Agent DVRTM is freeware with a subscription option, and can be set up to detect motion in the form of changes in a prescribed area chosen by the user. Settings can be altered for sensitivity as to when recording should be automatically started, how long it should continue after the motion ceases, along with the amount of video time in seconds recorded on the internal memory of the device as a buffer (15 seconds in this case). In this manner, it is possible to have a remote smartphone record video for so long as it has power and an internet connection.

In the application, the camera is connected via cable or Wi-Fi, and an area of activity is selected in the image. A sensitivity value is selected from 0 to 100. If a lightning flash is detected, which is determined from pixel color and light changes, it saves from the internal video recording buffer and backtracks to before the trigger event so that abrupt changes are not lost. Camera frame rate, or shutter speed plays an important role, as well as resolution and the area to be monitored.

While webcams and older smartphones are ubiquitous and low cost, it should be noted that details will be lost as they do not have as high a resolution, nor the time granularity of more capable smartphones and professional cameras. Since these attributes are crucial depending upon the distance, area to be covered, and desired characteristics of the imaging, consideration should be given to the technical specifications in balance with the required number of cameras, quality, and budget. The example of captured lightning image is shown in Figure (cloud-to-air discharge).

Figure. Cloud discharges over water captured by experimental lightning detector during tests

Additionally, a protective acrylic housing with an extra battery and stable mounting hardware should be considered, and are widely available. In general, there are many off-the-shelf options for hardware and software to monitor and record lightning strikes, and they can be explored and experimented with to obtain desired results. According to the results of testing, the proposed system proved to be quite effective. At the first stage of implementation, such systems can be installed on individual electricity pylons or nearby buildings.

In summary, using cameras to observe lightning strikes can help increase the overall resilience, reliability, and efficiency of a Smart Grid by improving fault detection, enabling predictive maintenance, and enhancing the situational awareness of grid operators. This approach provides a cost-effective method to enhance situational awareness and reliability in Smart Grid operations.

REFERENCES

1. Huang B., Fu Z., Chen J., Gu C. Remote online observation system of power system lightning stroke, *2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Shanghai, China, 2014. P. 922-926, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973255.
2. Miki M., Miki T., Shimizu M. Observation of lightning flashes to transmission lines using a high-speed camera system, 2010. *30th International Conference on Lightning Protection (ICLP)*, Cagliari, Italy, 2010. P. 1-6, doi: 10.1109/ICLP.2010.7845834.
3. Taniguchi S., Tsuboi T., Okabe S. Observation results of lightning shielding for large-scale transmission lines, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009. Vol. 16, No. 2, P. 552-559, doi: 10.1109/TDEI.2009.4815191.
4. Video Surveillance Software. URL: https://www.ispyconnect.com/download (дата звернення: 25.01.2025).

УДК 621.22

ДО МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГІДРОАКУМУЛЮВАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ІЗ ЗАМКНУТИМ ЦИКЛОМ РОБОТИ

В. М. Головко[1], Р. Ю. Семененко[2]

[1, 2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський просп., 37, м. Київ, Україна, 03056.
тел.: (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

Запропоновано способи аналізу ефективності гідроакумулювальної електростанції із замкнутим циклом роботи. Установка обладнана гідравлічним тараном, що збільшує загальну ефективність системи, та фотоелектричною установкою, що слугує зовнішнім джерелом енергії. Для моделювання енергетичних потоків у системі застосовано метод теорії множин, що дозволяє оцінити вплив ключових параметрів: ефективності гідравлічного тарану при різних режимах, сонячної інсоляції, гідравлічних втрат і параметрів насосної станції [1].

Ключові слова: *гідроакумулювальна електростанція, гідравлічний таран, фотоелектрична станція, енергетична ефективність.*

TO THE METHODOLOGY FOR DETERMINING THE EFFICIENCY OF A PUMPED STORAGE POWER PLANT WITH A CLOSED CYCLE OPERATION

V. Golovko[1], R. Semenenko[2]

[1, 2]National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteyskyi Prospect, Kyiv, Ukraine, 03056.
phone: (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

A methodology for analyzing the efficiency of a pumped storage hydroelectric plant (PSHP) with a closed-cycle operation that utilizes a hydraulic ram and a photovoltaic system (PVS) is proposed. The set theory method was used to model energy flows in the system, allowing for the evaluation of the impact of key parameters: ram pump performance, solar insolation, hydraulic losses, and pump station parameters [1] .

Key words: *pumped storage hydroelectric plant, hydraulic ram, photovoltaic system, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0003-0195-9654; [2]0000-0003-4737-7836.

Вступ

Гідроакумулювальні електростанції (ГАЕС) є перспективним рішенням для накопичення та повторного використання енергії. Включення гідравлічного тарана в цикл роботи дозволяє частково компенсувати енергетичні витрати на підйом води у верхній резервуар без використання електроенергії. Фотоелектрична система, що працює в комплексі з насосною станцією, сприяє зниженню навантаження на традиційні джерела енергії.

Методика дослідження

Для аналізу продуктивності системи використано метод теорії множин, що дозволяє оцінити вплив кожного компонента на загальний енергетичний баланс [2]. Основні параметри аналізу:

- **Сонячна інсоляція (I, кВт/м²)** – визначає потужність ФЕС.
- **ККД сонячних модулів (η)** – впливає на ефективність генерації електроенергії.
- **Гідравлічні втрати у трубопроводах** – визначають ефективність гідравлічного тарана.
- **Об’єм верхнього та нижнього резервуарів** – впливає на потенційну здатність накопичення енергії.

Основні результати

1. **Вплив гідротарана на енергоефективність.**
    - Гідротаран здатен повернути у верхній резервуар 10–50 % води, що дозволяє зменшити навантаження на насосну станцію.

- Енергетичний виграш можливий лише за умови мінімізації гідравлічних втрат.

2. **Баланс енергоспоживання системи.**
   - Додавання ФЕС дозволяє оптимізувати споживання енергії насосною станцією.
   - Висока інсоляція покращує роботу системи, проте в нічний час необхідно використовувати резервні джерела або акумуляцію енергії.
3. **Розрахунок об’єму резервуарів.**
   - Мінімальний необхідний об’єм верхнього резервуара визначається потребами споживача та динамікою заповнення системи.
   - Розрахунок водного балансу підвищує автономність ГАЕС у разі відсутності зовнішніх джерел живлення.

Висновки

Розрахунок енергетичних потоків у ГАЕС із гідротараном та ФЕС підтвердив можливість підвищення енергоефективності системи за рахунок часткового відновлення води у верхньому резервуарі та використання сонячної енергії для живлення насосної станції. Використання методу теорії множин дозволило врахувати основні параметри роботи системи та визначити критичні умови для її ефективного функціонування. Подальші дослідження будуть зосереджені на покращенні параметрів взаємодії компонентів системи та створенні імітаційної математичної моделі в MATLAB Simulink для тестування різних режимів роботи станції.

ПОСИЛАННЯ

1. Donets A. M. Stability conditions of loading modes of a wind-diesel installation. – Institute of Renewable Energy, NAS of Ukraine, 2017.
2. Popovych O. M., Golovan I. V. Simulation model of a hydroturbine for comprehensive modeling of a hydroelectric power plant's electromechanical system. Renewable Energy. 2023. No. 2. Pp. 51–60.

УДК 621.311.16

ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

О. В. Остапчук[1, 2], М. П. Болотний[1, 2]

[1]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
вул. Політехнічна, 37, м. Київ, 03056, Україна
[2] Інститут відновлюваної енергетики НАН України
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна
тел.: (066) 147- 09-10, e-mail: O.Ostapchuk@kpi.ua

У роботі досліджено засоби моделювання локальних енергосистем із використанням відновлюваних джерел енергії. Проаналізовано принципи мережевого планування для сталого розвитку енергосистем.

Ключові слова: *локальна енергосистема, відновлювані джерела енергії, мережеве планування, енергетична безпека.*

MEANS OF MODELING LOCAL ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

O. Ostapchuk[1, 2], M. Bolotnyi[1, 2]

[1]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37 Politekhnichna str., Kyiv, 03056, Ukraine
[2]Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
172 Antonovycha str., Kyiv, 03150, Ukraine
phone: (066) 147- 09-10, e-mail: O.Ostapchuk@kpi.ua

The study investigates the conditions for ensuring the balancing reliability of local energy systems using renewable energy sources. The principles of network planning for the sustainable development of energy systems are analyzed.

Key words: *local energy system, renewable energy sources, network planning, energy security.*

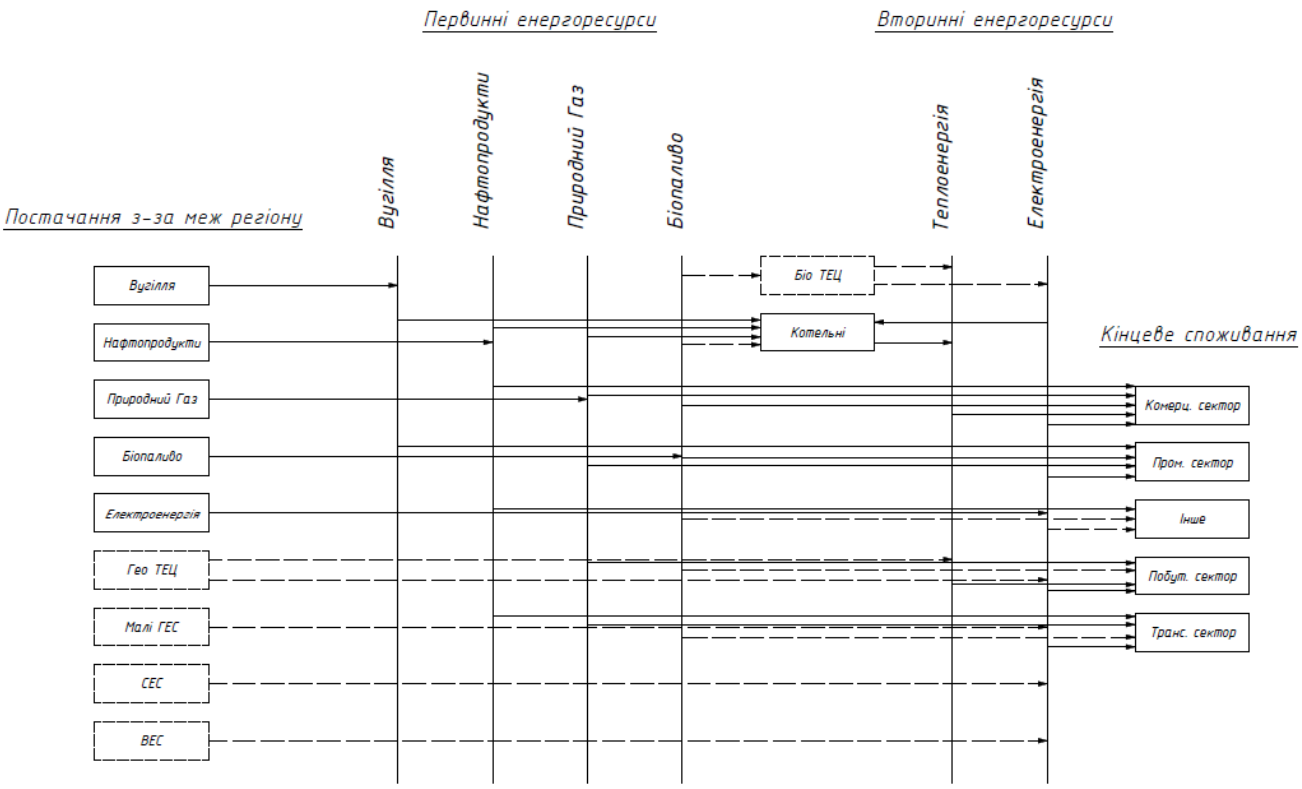
ORCID: [1]0000-0003-3397-2423; [2]0000-0002-7366-2430

Процес планування розвитку локальних систем потребує вирішення завдань з реконструкції, розширення чи модифікації існуючої системі електропостачання, що пов'язано з усіма фазами життєвого циклу подібних проєктів [1]. Спочатку планування локальної мережі відбувається на етапі розробки основної концепції та техніко-економічного обґрунтування проєкту, де головним завданням є визначення причин аварій, аналіз параметрів, режимів роботи та визначення режимів планових ремонтів, що вимагають застосування методів мережевого планування [2]. Складність мережевого планування зростає через значну географічну протяжність системи електропостачання та різні ієрархічні рівні її роботи, також часто це пов'язано з несумісністю окремих завдань, наприклад, технічних характеристик та економічної ефективності. Мережеве планування охоплює широкий діапазон часових інтервалів — від декількох хвилин до десятків років, причому в енергосистемі тимчасові та вартісні обмеження є найважливішими при плануванні змін та оновлень [3].

Розробка алгоритму побудови структури генерації енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії є одним з ключових завдань. Енергетична галузь характеризується складною поліструктурною системою, де різноякісні взаємопов'язані підсистеми формують ієрархічну побудову. На стан технічної, економічної, енергетичної та екологічної підсистем впливають як внутрішні, так і зовнішні фактори. Комплексна оцінка розвитку енергетики не може базуватися на окремих підгалузях, а модель енергетичної системи повинна відображати її базисні проєкції та загальні умови функціонування [4].

На рисунку представлена структурна схема цифрової моделі локальної енергосистеми в програмному забезпеченні VEDA-GAMS. Модель TIMES є оптимізаційною моделлю енергетичних потоків, яка оцінює найменші витрати на фу-

нкціонування локальної енергосистеми за заданих умов та обмежень. Локальна енергосистема представлена єдиним регіоном і складається з семи секторів: постачання енергії, виробництво електроенергії й тепла, промисловість, транспорт, побутовий сектор, торгівля та послуги, сільське господарство.



Структурна схема тестової локальної енергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії

Для формування сценарних припущень використовується ретроспективна й статистична інформація, а також державні й наукові документи щодо стратегічного розвитку економіки, енергетики, екологічної політики та нормативно-правової бази. Джерелами даних при цьому можуть слугувати база TIMES-Ukraine, статистика Держстату, дані Міненерго, МЕА, Біоенергетичної асоціації України, «Енергоатома», «Укренерго», ДТЕК, Світового банку, Інституту демографії НАНУ тощо.

Результати виконаного моделювання демонструють можливість оптимізації структури генерації локальних енергосистем з відновлюваними джерелами енергії. Запропонований підхід до моделювання локальних енергосистем з ВДЕ може бути використаний для розробки стратегій розвитку енергетики на регіональному та національному рівнях, а також для проєктування конкретних локальних енергосистем з оптимальною структурою генерації, що забезпечить підвищення енергетичної безпеки та сприятиме досягненню цілей сталого розвитку.

ПОСИЛАННЯ

1. Токунова А. Планування в енергетичній галузі: впровадження зарубіжного досвіду. Підприємство, господарство і право. 2015. Вип. 8. С. 33–36.
2. Драчук Ю. З., Яворська М. К., Зеркаль А. В. Аспекти розвитку нової енергетичної стратегії в Україні: європейський досвід використання розподіленої генерації. Економічний вісник Донбасу. 2023. № 1(71). С. 36–46. https://doi.org/10.12958/1817-3772-2023-1(71)-36-46
3. Салюк-Кравченко О. О. Концептуальне забезпечення розбудови енергетичної незалежності України у сучасному стратегуванні глобальної безпеки. Таврійський науковий вісник. Серія: Публічне управління та адміністрування. 2024. № 4. С. 31–44. https://doi.org/10.32782/tnv-pub.2024.4.5
4. Подолець Р. З., Дячук О. А. Стратегічне планування у паливно-енергетичному комплексі на базі моделі "TIMES-Україна": наук. доп. Київ: Інститут економіки та прогнозування НАН України, 2011. 150 с.

УДК 621.311.25

НЕЧІТКЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ В ПІДСИСТЕМАХ ЕЕС З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ ПРИСТРОЯМИ РПН СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Є. І. Бардик[1], І. В. Заклюка[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
кафедра відновлюваних джерел енергії,
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (050)-188-1731, e-mail: ihorzakliuka1@gmail.com

Розглянуто питання регулювання напруги у вузлах навантаження енергосистем з розподіленою генерацією пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН) силових трансформаторів (СТ) методами нечіткого моделювання. Запропоновано нечіткий алгоритм для регулювання напруги у вузлах навантаження пристроями силових трансформаторів з урахуванням ресурсних обмежень. Для системи електропостачання споживачів розподільної мережі проведено тестове дослідження режимів регулювання напруги при зміні вузлового навантаження.

Ключові слова: *розподілена генерація, силові трансформатори, технічний стан, ресурс, лінгвістична модель, регулювання напруги, нечітка логіка.*

FUZZY MODELLING OF VOLTAGE REGULATION PROCESSES IN POWER SYSTEM SUBSYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION BY ON-LOAD TAP-CHANGERS OF POWER TRANSFORMERS

E. Bardyk[1], I. Zakliuka[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Department of Renewable Energy Sources,
37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine
phone: (050)-188-1731, e-mail: ihorzakliuka1@gmail.com

The scientific work considers the voltage regulation in load nodes of power systems with distributed generation using power transformers on-load tap-changer devices by fuzzy modeling methods. A fuzzy algorithm for voltage regulation in load nodes by OLTC devices is proposed, taking into account resource constraints. For the consumers power supply system of the distribution network, a voltage control modes test study when changing the nodal load was conducted.

Keywords: *distributed generation, power transformers, technical condition, resource, linguistic model, voltage regulation, fuzzy logic.*

ORCID: [1]0000-0002-5776-1500, [2]0009-0009-9743-4318.

В умовах лібералізації електроенергетичної галузі України значно зростають вимоги щодо забезпечення надійності електропостачання споживачів, зокрема якості електроенергії. Відхилення параметрів якості електроенергії, з яких одним з основних є напруга на затискачах споживачів, жорстко регламентується і допускається в нормальних режимах роботи ±5 % номінальної напруги і ±10 % – в аварійних [1, 2]. Підключення джерел розосередженого генерування (ДРГ) також загострює проблему утримання напруги в допустимих межах в умовах зміни навантаження і топології електричної мережі, оскільки зниження напруги може призвести до зниження потужності генерування ДРГ [6].

Серед існуючих на сьогоднішній день в ЕЕС способів регулювання напруги [1, 3, 4] найпоширенішим є регулювання на виводах силового трансформатора під навантаженням зміненням коефіцієнта трансформації [1, 3] пристроями регулювання напруги під навантаженням (РПН).

Аналіз існуючих способів регулювання напруги в електричних мережах пристроями РПН СТ показав, що реалізовані в автоматичних регуляторах напруги закони регулювання напруги, забезпечуючи необхідну якість регулювання, не враховують наявний ресурс пристроїв РПН [1, 3–5], що призводить до зниження надійності їх функціонування. За результатами діагностування в комплексній математичній моделі визначається ТС пристрою РПН і формуються обмеження на допустиму кількість перемикань за деякий визначений термін експлуатації. Цей параметр є додатковою вхідною змінною в нечіткому алгоритмі Мамдані [5, 6] регулювання напруги у вузлі навантаження пристроями РПН СТ.

На вхід контролера, який функціонує за алгоритмом Мамдані, подаються такі параметри: напруга на шинах споживачів; швидкість змінення напруги та обмеження на кількість перемикань за термін спостереження; поточне положення відпайки РПН, а з виходу знімається напрямок перемикання і час, за який це перемикання повинно бути виконано. Терми вхідних і вихідних лінгвістичних змінних нечіткого регулятора напруги наведено нижче: напруга у вузлі навантаження $U=\left\{T_{ДН}^{U},T_{H}^{U},T_{MH}^{U},T_{B}^{U},T_{ДВ}^{U}\right\}$; швидкість змінення напруги $dU/dt=\left\{T_{H}^{dU/dt},T_{БН}^{dU/dt},T_{П}^{dU/dt}\right\}$; напрямок переміщення РПН $NAP=\left\{T_{BH}^{РПН},T_{H}^{РПН},T_{BB}^{РПН}\right\}$; положення відгалужень пристроїв РПН $X=\left\{T_{HC}^{X},T_{C}^{X},T_{BC}^{X}\right\}$; затримка на перемикання $t_{з}=\left\{T_{ДМ}^{З},T_{M}^{З},T_{C}^{З},T_{B}^{З},T_{ДВ}^{З}\right\}$; кількість перемикань $N_{перем}=\left\{T_{M}^{N_{перем}},T_{C}^{N_{перем}},T_{B}^{N_{перем}}\right\}$.

Для тестування розробленої комплексної математичної моделі було виконано діагностування ТС пристроїв РПН СТ та дослідження режимів регулювання напруги у вузлі навантаження для схеми електропостачання (рис. 1).

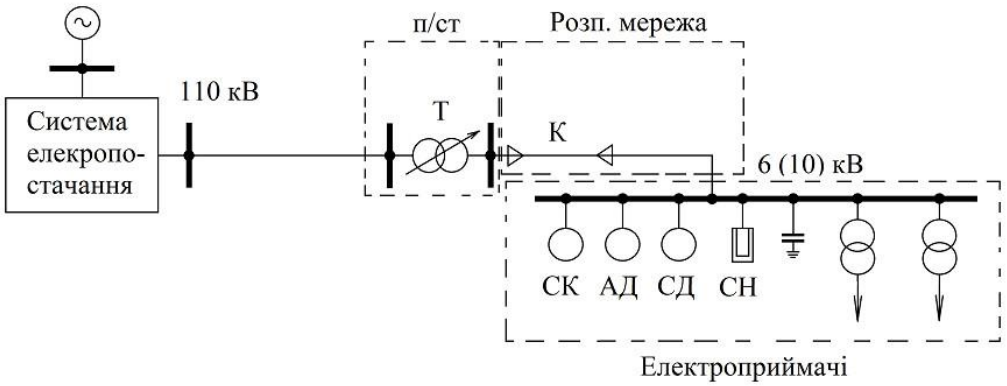


Рис. 1. Схема системи електропостачання споживачів вузла навантаження

Рівень напруги на шинах споживача в умовах змінення навантаження підтримується в допустимих межах дією нечіткого регулятора напруги СТ, який реалізує закон зустрічного регулювання і визначається з рівняння:

$U_{H}=U_{C}-I_{ЛЗ}\cdot Z_{зв}$, де U_{H} – напруга на шинах споживача; U_{C} – напруга на шинах системи нескінченної потужності (напруга на вторинній обмотці трансформатора); $Z_{зв}$ – опір зв'язку між шинами споживача і системи нескінченної потужності; $I_{ЛЗ}$ – струм у лінії зв'язку схеми електропостачання.

На рис. 2 наведено результати дослідження процесів регулювання напруги в розподільній мережі для різних обмежень кількості перемикань, що визначаються за результатами оцінки ТС пристроїв РПН СТ.

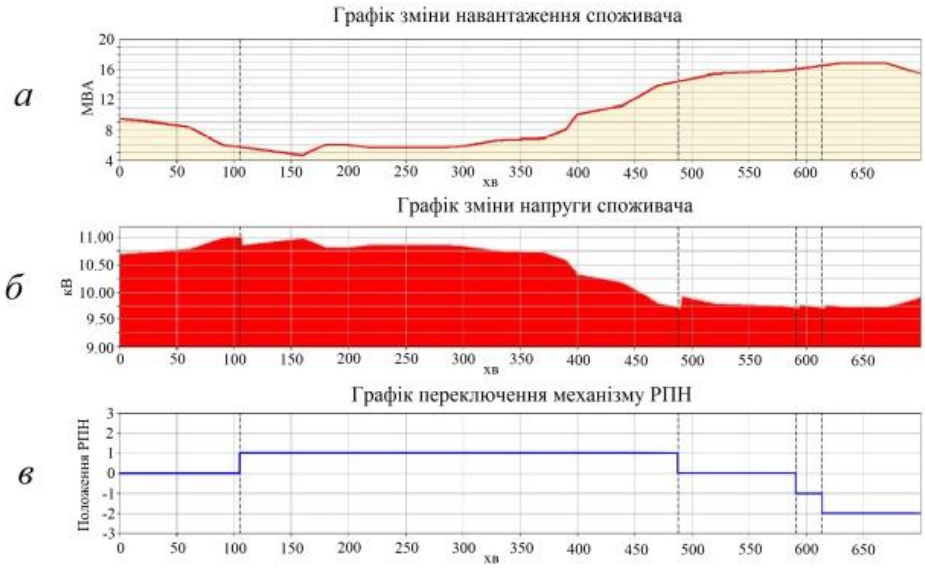


Рис. 2. Процеси зміни навантаження (а), напруги у вузлі навантаження (б) та положення відгалужень пристроїв РПН (в) у різних режимах роботи

Висновки. Забезпечення необхідного рівня надійності функціонування, якості електроенергії сучасних ЕЕС з відновлюваними джерелами енергії потребує врахування ТС і ресурсу працездатності СТ при реалізації алгоритмів регулювання напруги у вузлах навантаження. Розроблено нечітку модель визначення класу ТС і прийняття рішень щодо стратегії експлуатації пристроїв РПН СТ. Запропоновано нечіткий алгоритм і розроблено програмне забезпечення для регулювання напруги у вузлі навантаження пристроями РПН СТ з урахуванням їх ТС. Проведені дослідження показали доцільність і ефективність нечіткого моделювання ТС і режимів регулювання напруги пристроями РПН СТ, зокрема, необхідна якість регулювання напруги у вузлах навантаження забезпечується за меншої кількості перемикань.

ПОСИЛАННЯ

1. Грабко В. В. Моделі і засоби регулювання напруги за допомогою трансформаторів з пристроями РПН: монографія. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2005. 109 с.
2. Костерєв М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. К.:НТУУ "КПІ", 2011. 148 с.
3. Мокін Б. І., Грабко В. В., Львов Ш. Ю. Комп’ютерне моделювання системи регулювання напруги в електричних мережах. Проблеми создания нових машин і технологій. Сборник научних трудов Кременчугского государственного университета, вип. 2. Кременчук: КГПИ, 1999. С. 143–146.
4. Yan-Yih Hu, Feng-Chang Lu. A combined artificial neural network-fuzzu dynamic programming approach to reactive power/voltage control in a distribution substation. IEEE transagtion on Power Systems. Volume 13. November 1998. Page(s); 1265-
5. Bardyk E., Bolotnyi N. Parametric identification of fuzzy model for power transformer based on real operation data. Eastern-european journal of enterprise technologies. 2017. 6/8 (90). Pp. 4–10.
6. М. В. Шавранський, Я. Р. Когуч, В. М. Шавранський. Система нечіткого виводу регулювання напруги мережі в програмному середовищі MATLAB. Нафтогазова енергетика. 2008. № 3(8). С. 44–49.

УДК 621.311

ОЦІНКА ВПЛИВУ ПАРАМЕТРІВ НАВАНТАЖУВАЛЬНОЇ ЗДАТНОСТІ СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА НА ЙМОВІРНІСТЬ ВІДМОВИ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННЯХ

Є. І. Бардик[1], Я. С. Коваль[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра відновлюваних джерел енергії, просп. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна,тел./факс+38(050)-188-1731, e-mail:bard1. yevgen@ukr

Метою роботи є дослідження впливу параметрів навантажувальної здатності силових масляних трансформаторів на ймовірність їх відмови при різних режимах перевантаження на основі комплексної моделі прогнозування ресурсу ізоляції.

Ключові слова: *силові трансформатори (СТ), старіння ізоляції, навантажувальна здатність, імовірність відмови, температура найбільш нагрітої точки.*

ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF POWER OIL TRANSFORMER LOADING CAPACITY PARAMETERS ON THE PROBABILITY OF FAILURE DURING OVERLOADS

E. Bardik[1], Y. Koval[2]

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of Renewable Energy Sources, 37 Peremogy Av., Kyiv, 03056, Ukraine, phone/fax +38(050)-188-1731, e-mail: bard1. yevgen@ukr

The purpose of the work is to study the influence of power oil transformers' loading capacity parameters on their probability of failure under different overload modes based on a comprehensive insulation resource prediction model.

Key words: *power transformers (PT), insulation aging, loading capacity, probability of failure, hottest spot temperature.*

ORCID: [1] 0000-0002-5776-1500; [2] 0000-0001-8022-5821.

Силові трансформатори є ключовими елементами електричних мереж, які забезпечують надійне та безперебійне постачання електроенергії споживачам. Тривала експлуатація трансформаторів під впливом різноманітних факторів, таких як перевантаження, висока температура, зволоження і старіння ізоляції тощо, призводить до поступового погіршення їх технічного стану та збільшення ризику раптових відмов [1]. Аварійні випадки з трансформаторами можуть спричинити значні економічні збитки і негативні соціальні наслідки. Тому оцінка залишкового ресурсу та прогнозування ймовірності відмов трансформаторів є актуальним завданням для енергетичних компаній, виконання якого дозволяє підвищити ефективність управління парком трансформаторного обладнання й оптимізувати витрати на його обслуговування і ремонти [2].

Попри значний запас міцності та високу надійність конструкції масляні трансформатори під час тривалої експлуатації піддаються впливу різноманітних факторів, які можуть призводити до поступового погіршення їх технічного стану та виникнення аварійних режимів роботи [3]. Особливо негативно на стан ізоляції впливають циклічні перевантаження й температурні флуктуації, що прискорюють процеси деструкції целюлозних матеріалів ізоляції [4].

У цій роботі представлено результати моделювання п'яти типів трансформаторів серії ТМ (ТМ-40, ТМ-100, ТМ-250, ТМ-400, ТМ-630) з різними номінальними потужностями (від 40 до 630 кВА) та характеристиками втрат холостого ходу (від 65 до 465 Вт) і короткого замикання (від 95 до 780 Вт). Це дозволяє охопити широкий спектр силових трансформаторів, що експлуатуються в розподільчих мережах.

Тому останнім часом все більше уваги приділяється розвитку системи неперервного контролю та діагностики масляних трансформаторів у режимі онлайн [5]. Сучасні системи моніторингу дозволяють відстежувати десятки діагностичних параметрів безпосередньо під час роботи трансформатора, як-от температура масла й обмоток у різних точках, струми й напруги, рівень часткових розрядів, вміст газів та вологи в маслі, тиск масла тощо [6]. Це дає можливість виявляти навіть незначні відхилення від норми на ранніх стадіях розвитку дефектів та оперативно реагувати на них.

Особливо важливим є моніторинг спрацьованого ресурсу твердої ізоляції обмоток трансформаторів, оскільки цим параметром визначається його термін експлуатації [7].

Для аналізу впливу параметрів навантажувальної здатності на ймовірність відмови було розроблено комплексну математичну модель, яка враховує такі ключові параметри: температурні режими роботи трансформатора в точках контролю; динаміку навантаження з урахуванням коефіцієнтів заповнення графіка; сезонні, тижневі та добові коливання споживання електроенергії;кліматичні умови експлуатації з погодинними даними за 10-річний період.

Для реалізації моделі використано метеорологічні дані за період 2014–2024 рр., отримані з метеостанції Київ-Бориспіль, що забезпечує високу достовірність результатів моделювання та враховує реальні сезонні коливання температури.

Відмови силових трансформаторів можуть виникнути внаслідок дії багатьох факторів: за наявності дефекту окремих функціональних вузлів, струмових перевантажень, перенапруг і кліматичних впливів [8, 9]. Важливою задачею є визначення ймовірності відмови СТ на інтервалі часу спостереження Δt після функціонування протягом терміну Т за фактором старіння ізоляції на основі використання кумулятивної функції відмов F(t) [10, 11].

Основою моделі є розрахунок температури найбільш нагрітої точки обмотки трансформатора (ТННТ), що здійснюється за удосконаленою формулою:

$$T_{\text{ННТ}_{\text{об}}} = T_{\text{ном}} + T_{mL} + T_{\text{ННТ}_{\text{м}}}$$

де Тном – температура навколишнього середовища, TmL – приріст температури масла за рахунок навантаження, що розраховується як $T_{mL} = T_{\text{ном}} * (\frac{1+d*K_{Л}^{2}}{1+d})^{x}$, $T_{\text{ННТ}_{\text{м}}}$ – перевищення температури найбільш нагрітої точки над температурою масла, що залежить від коефіцієнта навантаження як $T_{\text{ННТ}_{\text{м}}} = (T_{\text{ННТ}_{\text{м}}} - 60) * K_{Л}^{y}$, де х та у – емпіричні коефіцієнти, характерні для кожного типу трансформатора.

У процесі дослідження було проаналізовано динаміку інтенсивності відмов λ(t) та кумулятивної функції відмов F(t) п'яти типів трансформаторів протягом десятирічного періоду (2014–2024 рр.). Моделювання проводилось з погодинним часовим кроком, що дозволило врахувати вплив добових, сезонних та річних коливань навантаження і температури навколишнього середовища.

Встановлено, що інтенсивність відмов залежить від температури найбільш нагрітої точки за вдосконаленою формулою:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{C * exp^{\frac{B}{T_{\text{ННТ}}+273}}} * (\frac{t}{C * exp^{\frac{B}{T_{\text{ННТ}}+273}}})^{(\beta-1)}$$

де B, C, β – параметри моделі старіння, що були оптимізовані на основі статистичних даних про відмови силових трансформаторів.

Для вирішення цих задач розроблена модель СТ і програмне забезпечення, що дозволяє протягом життєвого циклу СТ до моменту спостереження на основі добових графіків навантаження й температури навколишнього середовища визначити добове погодинне значення температури масла у верхніх шарах і в найбільш нагрітій точці, а також оцінити інтенсивність відмови та значення функції F(t) для процесу старіння твердої ізоляції обмотки [12].

Імовірність відмови (виходу з ладу) [13] внаслідок старіння ізоляції на наступному інтервалі Δtекв після виживання протягом періоду Т визначається:

$$F(\Delta t) = P_{\eta}\big(T \le t \le (T + \Delta t | t > T)\big) = \frac{F_{\text{із}}\big(T_{\text{екв}} + (\Delta t_{\text{екв}} | \theta_{\text{ННТ}}) - F_{\text{із}}(T_{\text{екв}} | \theta_{\text{ННТ}})\big)}{1 - F_{\text{із}}(T_{\text{екв}} | \theta_{\text{ННТ}})}$$

де $\theta_{\text{ННТ}}$ – температура в найбільш нагрітій точці обмотки трансформатора на момент спостереження.

Аналіз показав, що трансформатори серії ТМ з більшою номінальною потужністю мають нижчу інтенсивність відмов при однаковому відносному навантаженні. Так, для трансформаторів ТМ-630 середнє значення λ(t) на 15–20 % нижче порівняно з трансформаторами ТМ-40 при навантаженні 0,8–0,9 від номінального. Виявлено критичні режими навантаження, при яких відбувається стрімке зростання функції F(t), що сигналізує про критичне спрацювання ресурсу ізоляції. Для трансформаторів малої потужності (ТМ-40, ТМ-100) такі режими настають при коефіцієнті навантаження 1,4–1,5, а для потужніших моделей (ТМ-400, ТМ-630) – при значеннях 1,7–1,8. На рис. 1 наведено змінення інтенсивності вілмов $\lambda(t)$ і розподіл імовірності $F(\Delta t)$ силового трансформатора № 1 марки ТМ-40 при терміні експлуатації 20 років.

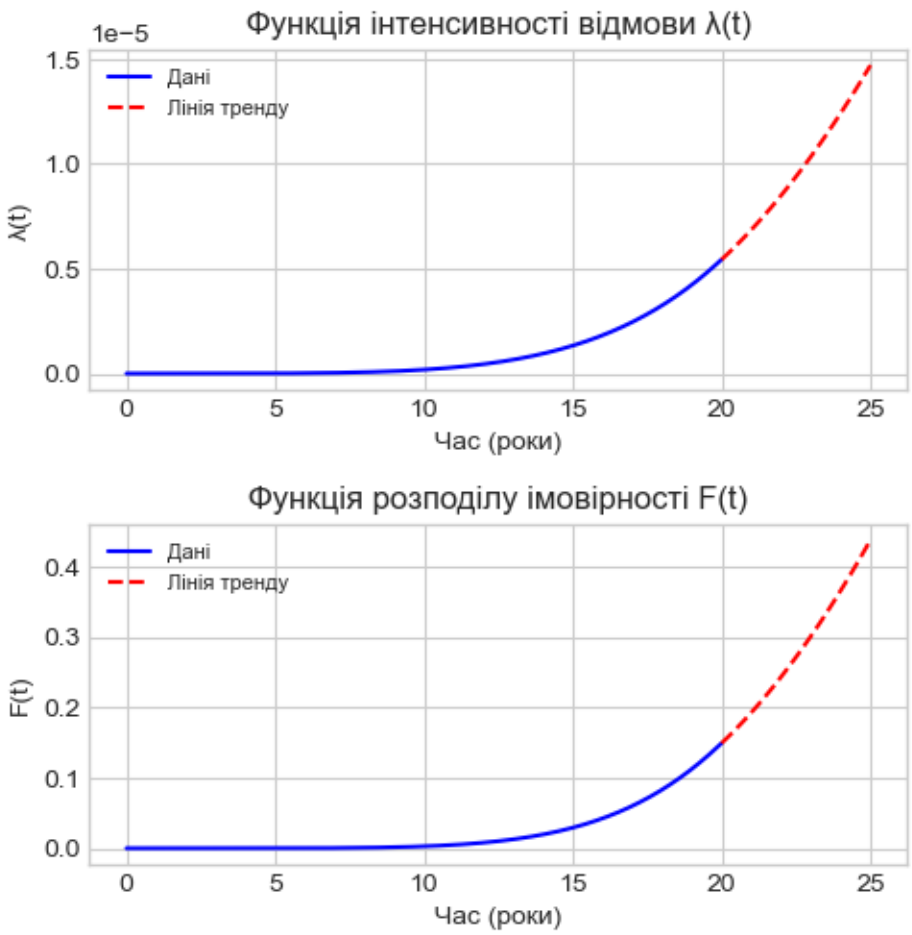


Рис. 1. Змінення інтенсивності вілмов $\lambda(t)$ і розподіл імовірності $F(\Delta t)$ силового трансформатора № 1 марки ТМ-40 при терміні експлуатації 20 років

Важливим результатом дослідження є отримання кількісних оцінок кумулятивної функції відмов F(t) для різних трансформаторів. Встановлено, що за однакових умов експлуатації термін досягнення критичного значення F(t) = 1 для трансформаторів різних типів може відрізнятися на 2-3 роки.

Висновки. У процесі проведеного дослідження побудовано вдосконалену математичну модель силового трансформатора для визначення ресурсу працездатності, інтенсивності відмови на момент спостереження та розрахунку ймовірності відмови на інтервалі в короткостроковий прогнозний період експлуатації. Новизна в запропонованій моделі полягає в комплексному врахуванні фактичних режимів навантаження та температурних умов експлуатації з погодинним часовим кроком протягом всього терміну служби трансформатора. Кількісно підтверджено, що перевантаження трансформаторів навіть на короткий час (2-3 год) з коефіцієнтом 1,5–1,8 від номінального може збільшити ймовірність їх відмови в майбутньому на 12–18 % через прискорене незворотне старіння целюлозної ізоляції обмоток. Ця модель є складовою комплексної математичної моделі оцінки ризику відмови СТ і може бути інтегрована в сучасні системи моніторингу та діагностики трансформаторного обладнання.

ПОСИЛАННЯ

1. Saha T. K. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 10(5), pp. 903–917.
2. M. Arshad, S. M. Islam, and A. Khaliq, "Power transformer insula- Don response and risk assessment," in Proc. Int. Conf. Probabilistic the Methods Applied to Power Systems, 2004, pp. 502–505.
3. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators, IEEE Standard C57.91-2011, 2012.
4. P. Wang and R. Billinton, "Reliability cost/worth assessment of distribution systems incorporating time-varying weather conditions and restoration resources," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 17, no. 1, pp. 260–265, Feb. 2002.

5. Zhang X., Gockenbach E. Asset-Management of Transformers Based on Condition Monitoring and Standard Diagnosis. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2018, 24(4), pp. 26–40.
6. Susa D., Lehtonen M., Nordman H. Dynamic Thermal Modelling of Power Transformers. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 20(1), pp. 197–204.
7. O. V. Klymenko, "Аналіз впливу силового трансформатора на усталений режим електричної мережі," Вісник Вінницького політехнічного інституту, вип. 1, с. 89–93, 2017.
8. B. D. Lahoti and D. E. Flowers, "Evaluation of transformer loading above nameplate rating," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, J vol. PAS-100, no. 4, pp. 1989–1998, Apr. 1981.
9. W. J. McNutt, "Insulation thermal life considerations for transformer Toading guides," IEEE Trans. Power Del., vol. 7, no. 1, pp. 516–521, Jan. 1992. (дата звернення: 03.09.2021).
10. Y. G. Bae, P. N. Adkins, and D. W. Bree, "Quantitative evaluation of the cost and benefits associated with transformer loading," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-98, no. 1, Jan./Feb. 1979.
11. W. J. McNutt and G. H. Kaufmann et al., "Short-time failure mode considerations associated with power transformer," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, no. 3, pp. 1186–1197, May/June 1980.
12. V. V. Makoviychuk, "Аналіз впливу особливостей конструктивного виконання трансформаторів на їх надійність," Вісник Національного технічного університету "ХПІ", вип. 3, с. 45–50, 2024.
13. A. Dolopikula**,** "Аналіз принципів побудови та функціональних можливостей систем моніторингу стану силових трансформаторів", Електротехніка і електроенергетика*,* вип. 4, с. 25–30, 2020.

УДК 621.311

ВИБІР СТРУКТУРИ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЛОКАЛЬНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Т. П. Нечаєва[1], В. А. Денисов[2]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (044) 294-67-20, e-mail: nechaieva.tan@gmail.com

Проголошена на державному рівні стратегічна мета декарбонізації національної енергетики України до середини поточного століття вимагає подальшого збільшення частки відновлюваної енергії в балансі регіональних енергосистем. Децентралізацію енергетичної системи з орієнтацією на розвиток розподіленої генерації на основі ВДЕ та застосуванням установок зберігання енергії закладено в Енергетичній Стратегії України до 2050 року. Запропоновано метод формування структури потужностей енергосистеми з визначенням кількості установок ВЕС та СЕС для максимального покриття попиту на електроенергією локальної енергосистеми громади.

Ключові слова: *розподілена генерація, відновлювані джерела енергії, локальна енергосистема, графік електричного навантаження, моделювання.*

DETERMINING THE STRUCTURE OF DISTRIBUTED GENERATION OF THE LOCAL POWER SYSTEM

T. Nechaieva[1], V. Denysov[2]

General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (044) 294-67-20, e-mail: nechaieva.tan@gmail.com

The strategic goal of the decarbonization of Ukraine's national energy sector by the middle of the current century, declared at the state level, requires a further increase in the share of renewable energy in the balance of regional energy systems. The decentralization of the power system with a focus on the development of distributed RES-based generation and the usage of energy storage facilities is laid down in the Energy Strategy of Ukraine by 2050. The method of formation of the power system capacity structure with determination of the amount of WPP and SPP units for maximizing the electricity demand of the community's local power system is developed.

Key words: *distributed power generation, renewable energy sources, local power system, electric load schedule, modelling*

ORCID: [1]0000-0001-9154-4545; [2]0000-0002-3297-1114.

Проголошена на державному рівні стратегічна мета декарбонізації національної енергетики України до середини поточного століття вимагає подальшого збільшення частки відновлюваної енергії в балансі регіональних енергосистем. Розвиток розподіленої генерації електричної енергії в територіальних громадах є одним із завдань оперативної цілі «Інфраструктура, стійка до безпекових, соціальних та економічних викликів», що забезпечує досягнення стратегічної мети Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки [1]. Пріоритетність розвитку розподіленої генерації на основі ВДЕ в поєднанні з гнучкими енергетичними потужностями й технологіями акумуляції енергії визначено у Національному плані з енергетики та клімату на період до 2030 року [2], що є стратегічним документом, спрямованим на узгодження енергетичної та кліматичної політики для забезпечення сталого розвитку й відновлення економіки України. Децентралізація енергетичного сектору з орієнтацією на розвиток розподіленої генерації є одним з ключових принципів Енергетичної Стратегії України до 2050 року.

Для вирішення нагальної потреби в прискореному будівництві та/або розміщенні нової розподіленої генерації розроблено Стратегію розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року [3], в якій визначено доцільні для створення систем розподіленої генерації типи генерувальних потужностей. До них віднесено: газотурбінні та газопоршневі установки на природному газі, когенераційні установки, включно з використанням відновлюваних газів, зокрема біометану як палива замість природного газу, ВЕС, СЕС, біоенергетичні електростанції, малі ГЕС та установки зберігання енергії. Техніко-економічний аналіз таких технологічних рішень, які можуть бути швидко реалізовані в

Україні для підтримки розподіленої генерації та підвищення безпеки постачання електроенергії, наведено в розробленому Міністерством енергетики України в межах Українсько-Данського енергетичного партнерства Каталозі критично важливих технологій для енергетичного сектору України [4].

Впровадження установок розподіленої генерації на ВДЕ в локальних енергосистемах для задоволення потреб споживачів в електричній енергї потребує врахування їх територіального енергетичного потенціалу. Це стосується як ВЕС та СЕС зі значно мінливою потужністю, залежною від природних та метереологічних умов, так і наявності первинного ресурсу для біотехнологій. Тому актуальною задачею є визначення кількості таких установок розподіленої генерації, доцільних до впровадження в межах локальної енергосистеми територіальної громади для максимального забезпечення попиту споживачів.

Розроблений метод визначення кількості впровадження установок ВЕС та СЕС одиничної потужності в локальній енергосистемі територіальної громади засновано на ітераційному використанні моделі математичного програмування визначення оптимального складу та режиму використання потужностей при покритті добових графіків навантаження енергосистеми протягом всього року з подальшим аналізом отриманих на кожному етапі результатів та формуванням діапазону обмеження змінних. Під час моделювання використано дані щодо погодинної потужності установок ВЕС та СЕС номінальної потужності 1 МВт, характерні для їх географічного розташування в межах досліджуваної громади, сформовані з використанням системи моделювання генерації відновлюваних джерел енергії System Advisor Model (SAM) [4] Національної лабораторії відновлюваної енергії (NREL, США).

Основним обмеженням моделі є баланс виробництва-споживання електричної енергії локальної енергосистеми, який складається з погодинних потужностей генерації P_{kt} одиничних установок ВЕС та СЕС та змінних їх кількості n_k, що обмежуються певним діапазоном значень, а також змінних x_{kt}^{TPP} потужностей маневрених установок, потужностей заряду / розряду yr_t^{AB}, yz_t^{AB} акумуляційних систем та змінних потужностей імпорту-експорту z_t^I, z_t^E із зовнішньої мережі, що забезпечують покриття споживання електроенергії D_t місцевою громадою протягом години t

$$\sum_{k=PV,WPP} n_k P_{kt} + \sum_{k\in K^{TPP}} x_{kt}^{TPP} + yr_t^{AB} - yz_t^{AB} + z_t^I - z_t^E = D_t, \quad \forall t \in T$$
$$N_k^{MIN} \le n_k \le N_k^{MAX}, \quad k = PV, WPP \qquad ,$$

де T – множина часових періодів (години доби); K^{TPP} – множина установок, що використовуються в змінних режимах навантаження; PV – установки СЕС; WPP – установки ВЕС.

Цільовою функцією є мінімізація витрат локальної енергосистеми для кожної доби року, в якій враховано собівартості кожного типу установок, вартості заряду / розряду акумуляційної системи та експорту / імпорту електроенергії з зовнішньої мережі. Реалізацію математичної моделі з подобовими оптимізаційними розрахунками та формуванням їх результатів у добовому, місячному та річному вимірах проведено з використанням програмно-інформаційного комплексу [6], розробленого з використанням комбінації стандартного програмного забезпечення Microsoft Excel і надбудови SolverStudio.

ПОСИЛАННЯ

1. Про затвердження Державної стратегії регіонального розвитку на 2021–2027 роки. Постанова Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 695 https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/695-2020-%D0%BF#Text (дата звернення: 23.10.2024)
2. Національний план з енергетики та клімату на період до 2030 року. Міністерство економіки України. URL: https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=17f558a7-b4b4-42ca-b662-2811f42d4a33&title=NatsionalniiPlanZEnergetikiTaKlimatuNaPeriodDo2030-Roku (дата звернення: 23.10.2024).
3. Про схвалення Стратегії розвитку розподіленої генерації на період до 2035 року і затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2024–2026 роках. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 18 липня 2024 р. № 713-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/713-2024-%D1%80#Text (дата звернення: 23.10.2024).
4. Каталог критично важливих технологій для енергетичного сектору України. Міністерство енергетики України. URL: https://mev.gov.ua/storinka/kataloh-krytychno-vazhlyvykh-tekhnolohiy-dlya-enerhetychnoho-sektoru-ukrayiny (дата звернення: 23.10.2024).
5. System Advisor Model™ Version 2023.12.17 (SAM™ 2023.12.17). National Renewable Energy Laboratory. Golden, CO. https://https://sam.nrel.gov (дата звернення: 30.07.2024).
6. Denysov, V., & Babak, V. (2023). Software and information simulation complex of multinode integrated and autonomous power and heat supply systems. System Research in Energy, (3 (74), 50–63. https://doi.org/10.15407/srenergy2023.03.050.

УДК 621.311.25

SOME FEATURES OF USING THE IEC 61850 IN RENEWABLE ELECTRICAL EQUIPMENT DIAGNOSTIC SYSTEMS

B. Samkov[1], V. Zvaritch[1]

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteyskyi Ave., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com

The thesis consider the use of the International Electrotechnical Commission (IEC) standard 61850 in the context of diagnosing renewable sources' electrical equipment. Key aspects of implementing this standard for effective diagnostics and monitoring of electrical systems are considered. The analysis of the features of IEC 61850 usage in fault detection and analysis are carried out, in particular, taking into account the provision of standardized data exchange and the use of the Sampled Values protocol for accurate measurements of system parameters. The advantages and challenges of using the standard in the context of diagnostics are considered, as well as possible ways to optimize monitoring processes and prevent possible failures. Current research and practical testing are highlighted to help understand the effectiveness and potential of using the IEC 61850 in the field of electrical equipment diagnostics.

Key words: *IEC 61850, measurements, multi-level system, diagnostics.*

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ СТАНДАРТУ IEC 61850 В СИСТЕМАХ ДІАГНОСТИКИ ЕЛЕКТРИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ

Б. О. Самков[1], В. М. Зварич[2]

Інституту електродинаміки НАН України,
Просп. Берестейський, 56, Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 501-79-34, e-mail:zvaritch@gmail.com

В доповіді розглядає використання стандарту Міжнародної електротехнічної комісії (IEC) 61850 у контексті діагностування електротехнічного обладнання. Розглядаються ключові аспекти впровадження цього стандарту для ефективної діагностики та моніторингу стану електричних систем. Здійснюється аналіз особливостей використання IEC 61850 в завданнях виявлення та аналізу несправностей, зокрема з урахуванням забезпечення стандартизованого обміну даними та використання протоколу Sampled Values для точних вимірювань параметрів системи. Розглядаються переваги та виклики використання стандарту в контексті діагностування, а також можливі шляхи оптимізації процесів моніторингу та попередження можливих відмов. Висвітлюються актуальні дослідження та практичні випробування, які допомагають зрозуміти ефективність та перспективи використання стандарту IEC 61850 у сфері діагностики електротехнічного обладнання.
the field of electrical equipment diagnostics.

Key words: *IEC 61850, вимірювання, багаторівнева система, діагностика.*

ORCID: [1]0000-0003-0080-1978; [2]0000-0002-1271-4954.

In the current post-war conditions, the quality and reliability of electricity supply to consumers of various purposes is generally marked by their regulatory and legal support. It is necessary to take into account the current international obligations of Ukraine and the requirements of European legislation in such an important strategic industry as electric power engineering. At the same time, the process of adapting the domestic electric power industry to the standards of the EU countries is a very complex problem due to its peculiarities, one of which is due to the need to ensure the reliable functioning of the entire energy complex system of Ukraine and the EU countries while maintaining all electricity parameters at the levels regulated by international standards. One of such models was developed for communication systems, data transmission for the purpose of measuring and monitoring in various sectors of the economy, as the IEC 61850 (Substations' communication networks and systems). This paper examines new generation communication systems, provides a general overview of the protocol and its compliance with modern requirements.

Although the IEC 61850 was originally developed for use within a substation, there are discussions about defining the IEC 61850 as the primary communication protocol between substations (there are already several use cases). In the 90s of the last century, the energy industry faced the problem of using analogue and digital devices in the same systems for monitoring and diagnosing electrical equipment, which was the prerequisite for the creation of the IEC 61850. In addition, there are known cases of using different components of the IEC 61850 for a global communication system between substations. In particular, Nokia uses and develops this standard in the development of consumer-energy service systems.

The Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine is conducting research on the creation of multi-level systems for monitoring and diagnostics of electrical equipment [1-3]. Such systems are flexible and allow a customer to build an effective monitoring system and, in some cases, a diagnostic system for electrical equipment. The IEC 61850 is advisable to use at the lower levels of the hierarchy of such multi-level systems. The IEC 61850 proposes the use of three data transfer protocols: MMS (Manufacturing Message Specification) protocol, GOOSE (Generic Object Oriented Substation Event) protocol, SV (Sampled Values) protocol. The Sampled Values protocol defines a standardized way to transmit analogue value measurements in real time. This is especially important in systems with high demands on accuracy and speed, such as power grid protection and control. SV allows the transmission of voltage, current, and other important parameters in real time, ensuring the necessary accuracy and excellent synchronization.

MMS is used to transfer data from the relay protection and automation (RPA) terminals to SCADA system for further visualization, and GOOSE is used to exchange data between terminals. An important feature of the protocols is a guaranteed message delivery, and the data transfer rate for MMS and GOOSE is higher than in other data transfer protocols, for example, Modbus. The interchangeability of individual system components is achieved through standardization of data transfer protocols, as well as through strict requirements for equipment compatibility.

The services and MMS protocol operate on the full OSI model on top of the TCP stack, due to which data transmission via this protocol is carried out with relatively large time delays, therefore, the use of MMS protocol allows solving data transmission tasks for which delay is not critical. For example, this protocol can be used to transmit telecontrol commands, collect telemetry and telesignaling data, and send reports and logs from remote devices. Since the data of GOOSE protocol is assigned directly to the Ethernet frame, bypassing OSI model and bypassing TCP stack, data transmission in it is carried out with lower delays, compared to MMS. In multi-level monitoring systems of electrical equipment, it is advisable to use SV protocol, since it uses a multicast method of distribution. This model is used when it is necessary to transmit the same information to several users over the network and not to overload the communication channels. The application of these protocols in the relevant IEC 61850 scenarios contributes to improving the efficiency and safety of power systems by ensuring their standardization and modern interoperability between devices. The Sampled Values protocol plays a key role in enabling high-frequency and accurate data exchange in power systems, where event response and measurement accuracy are critical to ensure system reliability and safety.

The IEC 61850 addresses most of the issues arising in connection with digital transformations, namely, standardization of data names, creation of a complete set of services, implementation of standard protocols and hardware, and definition of the process bus. The standard reflects the interoperability of equipment from different manufacturers with the established processes for conformity certification. The possibility of using the IEC 61850 as a communication protocol between substations and control center is discussed.

The research was conducted within the framework of project 2023.04/0022, "Development of a Hardware-Software Complex and Methodology for Rapid Detection of Damages in Heating and Water Supply Systems Considering Their Wear and Tear and Military Impacts," funded by the National Research Foundation of Ukraine (NRFU)

REFERENCES

1. Babak V.P., Babak S.V., Myslovych M.V., Zaporozhets A.O., Zvaritch V.M. (2020). Methods and Models for Information Data Analysis. In: Diagnostic Systems For Energy Equipments. Studies in Systems, Decision and Control, vol 281. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3_2
2. Zvaritch V., Myslovych M., Gyzhko Y. (2021) Application of Linear Random Processes to Construction of Diagnostic System for Power Engineering Equipment. In: Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds) Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. APMS 2021. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 630. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-85874-2_67
3. Samkov O.V., Koval V.V., Lysenko V.P., Chopyk V.V., Osinskyi O.L., Samkov B.O. development of digital means of multichannel monitoring of time synchronization devices of power SMART Grid systems // The works of the Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine. Issue 65 (2023). – P.28-32. ISSN 1727-9895, ISSN 2786-7064 (online). DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2023.65

УДК 621.3

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОПИТОМ В ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ УКРАЇНИ

В. О. Комар[1], Р. М. Насадюк[2], Я. С. Таранюк[3]

Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна,
тел.: (067) 987-51-70, e-mail: kvo1976@ukr.net

Завдяки впровадженню систем керування попитом (DSM) формується можливість оптимізувати розподіл навантажень, підвищити енергоефективність та забезпечити надійність електропостачання. Описані конкретні методи – встановлення розумних лічильників, використання аналітичних платформ для моніторингу споживання та математичне моделювання пікових навантажень – дозволяють визначити ключові переваги та виявити перешкоди для модернізації енергетичного сектору в Україні.

Ключові слова: *системи керування попитом, локальні електроенергетичні системи, енергоменеджмент, відновлювані джерела енергії, енергоефективність.*

FEATURES OF THE APPLICATION OF DEMAND-SIDE MANAGEMENT SYSTEMS IN UKRAINE'S LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEMS

V. Komar[1], R. Nasadiuk[2], Ya. Taranyuk[3]

Vinnytsia National Technical University
95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021
phone: (067) 987-51-70, e-mail: kvo1976@ukr.net

Thanks to the implementation of demand-side management systems (DSM), it becomes possible to optimize load distribution, increase energy efficiency, and ensure the reliability of electricity supply. The specific methods described – the installation of smart meters, the use of analytical platforms for consumption monitoring, and the mathematical modeling of peak loads – allow for the identification of key advantages and the detection of obstacles to the modernization of the energy sector in Ukraine.

Key words*: demand-side management systems, local electric power systems, energy management, renewable energy sources, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0003-4969-8553; [2]0009-0006-4482-6324; [3]0009-0009-3386-5231.

Вступ

Український енергетичний сектор останніми роками зазнає значних трансформацій, зумовлених необхідністю модернізації застарілої інфраструктури та інтеграції відновлюваних джерел енергії, що ускладнюється бойовими діями і систематичними обстрілами. Зростання попиту на електроенергію, нерівномірний розподіл навантаження та виклики, пов'язані з енергетичною безпекою, спонукають до впровадження сучасних технологій енергоменеджменту. Одним із перспективних напрямів є система керування попитом (DSM), яка дозволяє ефективно координувати споживання електроенергії на рівні кінцевих споживачів без необхідності значних капіталовкладень у нові генерувальні потужності. У роботі розглядаються проблеми, з якими стикаються на шляху впровадження DSM у локальних електроенергетичних системах України, з урахуванням специфічних економічних, технічних та соціальних умов країни. Основою для аналізу виступають сучасні наукові підходи, висвітлені в літературі, що стосуються енергоменеджменту та розумних мереж, зокрема концепції інтегрованих систем керування.

Основна частина

У сучасних умовах розвитку української енергетики особливу увагу слід приділяти оптимізації споживання електроенергії через впровадження систем керування попитом, які спрямовані на зменшення пікових навантажень та підвищення ефективності розподілу ресурсів. Застосування DSM в українських локальних мережах дозволить забез-

печити більш стабільну роботу енергосистеми, знизити витрати на експлуатацію застарілої інфраструктури та сприяти інтеграції розподіленого генерування. Практична реалізація такого підходу вимагає впровадження сучасних технологій, як-от розумні лічильники, системи дистанційного моніторингу та управління, а також алгоритмів прогнозування навантаження. Одним із ключових завдань DSM є динамічне регулювання споживання електроенергії з урахуванням змін тарифів, погодних умов та змін у виробництві електроенергії з відновлюваних джерел. Це дозволяє не лише зменшити навантаження на мережу в пікові години, але й стимулювати споживачів до більш раціонального використання електроенергії.

Впровадження DMS дозволить отримати позитивний результат як з боку енергосистеми, так і з боку кінцевого споживача. Можна знизити експлуатаційні витрати виробництва електроегергії, використовуючи генератори, які мають нижчі витратні характеристики. А натомість генерувальні потужності, які мають значно більші витратні характеристики, використовувати для покриття додаткового навантаження в певні пікові періоди. Системні оператори (системи розподілу та передачі) можуть використовувати керування енергією для зменшення втрат енергії в мережі. І, нарешті, кінцеві користувачі (наприклад, домогосподарства, житлові та комерційні будівлі, промислові підприємства тощо) використовують управління енергією, щоб планувати навантаження та ефективно зменшувати свої рахунки за електроенергію.

Значну роль у впровадженні систем керування попитом відіграє активна участь кінцевих споживачів, які, отримуючи інформацію про реальний стан мережі та змінні тарифи, можуть самостійно коригувати свій режим споживання. Для цього необхідно проводити інформаційні кампанії та створювати сприятливі умови для залучення населення до енергозбереження. Розвиток технологій інтернету речей (IoT) та інтеграція їх у систему розумних мереж дозволяє забезпечити двосторонній зв’язок між енергопостачальниками та споживачами, що відкриває нові можливості для впровадження DSM. При цьому важливим аспектом є створення національних стандартів і нормативно-правової бази, які б забезпечували ефективну взаємодію всіх учасників ринку. Практичні кейси з інших країн демонструють, що впровадження систем керування попитом дає змогу знизити витрати на генерацію електроенергії та оптимізувати роботу мережі, що є надзвичайно актуальним для України в умовах економічної трансформації та енергетичної безпеки.

Висновок

Проведений аналіз демонструє, що впровадження систем керування попитом у локальних електроенергетичних системах України має великий потенціал для підвищення енергоефективності, зниження пікових навантажень та оптимізації використання існуючих ресурсів. Системи керування попитом сприяють більш гнучкому та адаптивному розподілу електроенергії, що є надзвичайно важливим для забезпечення стабільної роботи мережі в умовах зростаючої інтеграції відновлюваних джерел. Проте успішне впровадження DSM вимагає комплексного підходу, включно з модернізацією інфраструктури, розробкою нормативно-правової бази, підвищенням кваліфікації кадрів та активною участю споживачів. Рекомендовано проводити подальші дослідження та створювати пілотні проєкти з метою адаптації іноземних технологічних рішень до специфіки українського ринку, що дозволить забезпечити стійкий розвиток енергетичної системи країни та підвищення рівня енергетичної безпеки.

ПОСИЛАННЯ

1. Khan, N., Shahid, Z., Alam, M. M., Sajak, A. A. B., Mazliham, M. S., Khan, T. A., & Rizvi, S. S. A. (2022). Energy Management Systems Using Smart Grids: An Exhaustive Parametric Comprehensive Analysis of Existing Trends, Significance, Opportunities, and Challenges. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, Article ID 3358795. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2022/3358795 (дата звернення: 03.03.2025).
2. Bakare, M. S., Abdulkarim, A., Zeeshan, M., & Shuaibu, A. N. (2023). A comprehensive overview on demand side energy management towards smart grids: Challenges, solutions, and future direction. Energy Informatics, 6, 4. URL: https://energyinformatics.springeropen.com/articles/10.1186/s42162-023-00262-7 (дата звернення: 03.03.2025).
3. Panda, S., Mohanty, S., Rout, K., & Sahu, B. K. (2023). A comprehensive review on demand side management and market design for renewable energy support and integration. Energy Reports, 10, 2228–2250. URL: https://www.researchgate.net/publication/374754919_A_comprehensive_review_on_demand_side_management_and_market_design_for_renewable_energy_support_and_integration (дата звернення: 03.03.2025).
4. Makhotilo, K., & Kiianchuk, V. (2023, October). Участь побутових споживачів на енергетичних ринках через керування попитом. Energy Saving Power Engineering Energy Audit. URL: https://www.researchgate.net/publication/378336303_Ucast_pobutovih_spozivaciv_na_energeticnih_rinkah_cerez_keruvanna_popitom (дата звернення: 03.03.2025).

УДК 621.316.729:621.396.6

СИСТЕМИ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗУМНИХ МЕРЕЖ ТА МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З ПІДВИЩЕНОЮ ВІДМОВОСТІЙКІСТЮ

В. В. Коваль[1], О. В. Самков[2], В. І. Вакась[3], О. М. Піскун[4], Б. О. Самков[5]

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 12 в, м. Київ, 03041, Україна,
тел.: (096) 424-88-32, e-mail: v.koval@nubip.edu.ua,
[2, 5]Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (044) 366-24-00, e-mail: samkov@ied.org.ua
[3]Приватне акціонерне товариство «Київстар»,
вул. Дегтярівська, 53, Київ, 03113, Україна,
тел.: (067) 220 68 25, e-mail: v.vakas@ieee.org,
[4]Національний центр управління та випробувань космічних засобів,
вул. Князів Острозьких, 8, м. Київ, 02000, Україна,
тел.: (044) 288-51-39, e-mail: piskun@nkau.gov.ua

Розглянуто способи підвищення відмовостійкості систем синхронізації, що забезпечують покращення надійності функціонування розумних мереж та цифрових мобільних телекомунікацій в умовах воєнного стану. Під час розв'язання поставлених у роботі задач використовувалися методи резервування сигналів опорних джерел синхронізації, багатоканального моніторингу синхросигналів, передавання сигналів синхронізації з використанням протоколу PTP. Наводяться результати вимірювань на діючих мережах мобільних телекомунікацій.

Ключові слова: *розумні мережі, мобільні телекомунікації, синхронізація, відмовостійкість, PTP, вимірювання параметрів синхронізації.*

SYNCHRONIZATION SYSTEMS FOR SMART NETWORKS AND MOBILE TELECOMMUNICATIONS WITH ENHANCED FAULT RESILIENCE

V. Koval[1], O. Samkov[2], V. Vakas[3], O. Piskun[4], B. Samkov[5]

[1]National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
11 Heroyiv Oborony str., Kyiv, Ukraine, 03041
phone: (096) 424-88-32, e-mail: v.koval@nubip.edu.ua, smb.3@ukr.net
[2,5]Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine,
56 Beresteiskiy ave., Kyiv, 03057, Ukraine,
phone: (044) 366-24-00, e-mail: samkov@ied.org.ua
[3]Private Joint Stock Company "Kyivstar", 53 Degtyarivska str., Kyiv, 03113, Ukraine,
тел.: (067) 220 68 25, e-mail: v.vakas@ieee.org,
[4] National space facilities control and test center ,
8, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv , 01010, Ukraine,
phone: (044) 281-62-73, e-mail: piskun@nkau.gov.ua

Methods for increasing the fault tolerance of synchronization systems are considered, which ensure improved reliability of functioning for smart grids and digital mobile telecommunications in martial law conditions. When solving the tasks set in the work, methods of signal redundancy of reference synchronization sources, multichannel monitoring of synchronization signals, and transmission of synchronization signals using the PTP protocol were used. The results of measurements on operating mobile telecommunications networks are presented.

Key words: *smart grids, mobile telecommunications, synchronization, fault tolerance, PTP, measurement of synchronization parameters.*

ORCID: [1]0000-0003-0911-2538; [2]0000-0003-2790-8564; [3]0000-0002-0378-9989; [4]0000-0002-2009-9314; [5]0000-0003-0080-1978.

Системи синхронізації як в мобільних телекомунікаціях, так і в розумних мережах використовуються для вирішення часових невизначеностей. Синхросигнали, що сформовані цими системами на основі інформації від засобів супутникової навігації, не відповідають вимогам відмовостійкості в умовах воєнного стану. Підвищення відмовостійкості систем синхронізації об’єктів критичної інфраструктури є актуальною проблемою, розв'язання якої потребує додаткових методів і технічних засобів [1–4]. На сьогоднішній день для забезпечення систем телекомунікацій опорною частотою та сигналами точного часу широко застосовується технологія передачі синхросигналів цифровими мережами з комутацією пакетів (протокол PTP) [4, 5]. В Україні створені спеціалізовані мережі синхронізації, які забезпечують синхросигналами цифрові телекомунікаційні системи, базові станції мобільного зв’язку 2G/3G/LTE. З метою формування в умовах воєнного стану сигналів синхронізації з підвищеною відмовостійкістю запроваджені заходи, що забезпечують резервування мережі синхронізації систем мобільного зв’язку з урахуванням вимог Рекомендації ITU-T G.8261.1 [1, 4, 5]. Планування розміщення пристроїв синхронізації виконано з урахуванням географічних аспектів, регіональних особливостей, можливої заміни систем супутникової радіонавігації та використання більшої кількості першоджерел синхронізації. Наведено результати аналізу процесів переходу на резерв (інший пріоритет) у разі виникнення надзвичайних ситуацій та вимірювань на діючих мережах мобільних телекомунікацій. Запропонована і впроваджена автоматизована комп’ютерно-інтегрована система багатоканального моніторингу сигналів синхронізації, яка агрегує цифрові дані програмно-апаратних засобів різних виробників обладнання і забезпечує оперативну діагностику стану мережі синхронізації. Розроблено спосіб гібридного формування сигналів синхронізації часу інтелектуальних електроенергетичних мереж з підвищеною надійністю за рахунок використання інформації від систем супутникової навігації, первинних джерел з резервування елементів класичної мережі синхронізації TDM і мережі з комутацією пакетів за протоколом PTP та створення інтелектуальної комп’ютерно-інтегрованої системи, яка забезпечить постійний багатоканальний моніторинг параметрів синхронізації в режимі реального часу, а також формування достовірної інформації для підтримки прийняття рішень [1].

Враховуючи функції, які виконують сигнали синхронізації в мобільних телекомунікаціях і електроенергетичних системах та різницю у практичному вирішенні проблем їх надійності, пропонується в процесі створення розумних мереж використати позитивний досвід з підвищення відмовостійкості систем синхронізації стільникового зв’язку. Синергетичне використання світових досягнень у розвитку передових технологій різних галузей знань, насамперед електричної інженерії (електроенергетичні системи, електровимірювальні реєструвальні прилади), електроніки, автоматизації та електронних комунікацій (мікроконтролери, програмовані логічні інтегральні схеми, системи мобільного зв’язку, IP-мережі), інформаційних технологій (інтелектуальна комп’ютерно-інтегрована система багатоканального моніторингу), забезпечило можливість практичної реалізації вітчизняних високотехногічних систем синхронізації. Впровадження розроблених синхроінформаційних технологій, що підвищують відмовостійкість сигналів синхронізації, в ОЕС України є важливою складовою забезпечення надійності та живучості електроенергетичної системи як об’єкта критичної інфраструктури держави.

ПОСИЛАННЯ

1. Автоматизований моніторинг сигналів синхронізації часу енергосистем: монографія / В. В. Коваль, О. В. Самков, І. В. Блінов, О. Л. Ламеко, І. В. Трач, С. Й. Поліщук, В. І. Вакась, В. В. Чопик, О. Л. Осінський. К.: Видавничий центр НУБіПУ, 2021. 380 с.
2. Самков О. В., Коваль В. В., Лисенко В. П., Чопик В. В., Осінський О. Л., Самков Б. О. Розроблення цифрових засобів багатоканального моніторингу пристроїв синхронізації часу електроенергетичних SMART Grid систем. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Випуск 65 (2023). С. 28–32.
3. Самков О. В, Коваль В. В., Лисенко В. П., Кальян Д. О., Рибіна О. Б., Осінський О. Л. Пристрій багатоканального моніторингу синхросигналів SMART Grid енергосистем з оптимальним за швидкодією фазовим автопідстроюванням частоти. Технічна електродинаміка. К.: ІЕД НАН України. № 1 (2023), 2023. С. 81–92.
4. Vakas Vyacheslav, Koval Valerii, Manko Oleksandr, Oleh Piskun. Phase Synchronization of Base Stations in Multicast Mode. 2023 IEEE International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo), 2023. Pp. 128–131.
5. Vakas, V., Koval, V., Fedorova, N., Manko, O., Domin, D. Synchronization Implementations for 5G Mobile Networks. 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022; Lviv-Slavske; Ukraine; 22 February 2022. 26 February 2022/ Conference Proceedings16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2022). 2022. Pp. 244–247.

УДК 620.92:621.311.29

АНАЛІЗ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ У ЦИКЛІ СПРАЦЬОВУВАННЯ АДАПТИВНОГО ОДНОФАЗНОГО ПОВТОРНОГО ВВІМКНЕННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ НАДВИСОКОЇ НАПРУГИ

В. Г. Кузнецов[1], В. В. Кучанський[2], В. В. Шевчук[3], В. І. Кошман[4]

Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, м. Київ, 03157, Україна,
тел.: (050) 387-89-42, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

Проаналізовано електромагнітні перехідні поцеси в циклі спрацювання однофазного автоматичного повторного включення та розроблено спосіб керованого ввімкнення пошкодженої фази, який засновано на виділенні постійної складової відновлюваної напруги.

Ключові слова: *струм повторної дуги підживлення, резонансні перенапруги, лінійний цифровий фільтр нижніх частот, керовані шунтувальні реактори*

ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESSES IN THE OPERATION CYCLE OF ADAPTIVE SINGLE-PHASE RETURNING OF HIGH-VOLTAGE LINES

V. Kuznetsov[1], V. Kuchansky[2], V. Koshman[3], V. Shevchuk[4]

Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, 56 Beresteysky Ave., Kyiv, 03157, Ukraine,
тел.: (050) 387-89-42, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

Electromagnetic transient processes in the operating cycle of the SPAR have been analyzed and a method of controlled switching on of the damaged phase has been developed, which is based on the separation of the constant component of the restored voltage.

Keywords: re-arc current, resonant overvoltages, linear digital low-pass filter, controlled shunt reactors.

ORCID: [1]0000-0002-8648-7942; [2]0000-0002-5399-2942, [3]0000-0002-0704-1863, [4]0000-0003-0535-2630

Під час розробки адаптивного однофазного автоматичного повторного ввімкнення (ОАПВ) основним завданням є надійне визначення факту згасання дуги підживлення. Актуальність досліджуваної задачі підтверджується тим, що не існує універсального методу, який поєднує в собі високий рівень надійності визначення факту згасання вторинної дуги за різних конфігурацій параметрів лінії електропередавання (ЛЕП) та простоту реалізації алгоритму. З огляду на зазначене вище розробка простого і найменш трудомісткого способу адаптивного ОАПВ є пріоритетним завданням [1, 2].

У разі роботи ЛЕП у режимі перетікання значної потужності шунтувальні реактори можуть бути відключені за умови ведення режиму. У цьому разі після гасіння дуги підживлення на відключеній (пошкодженій) фазі відновлюється напруга, що містить постійну складову, початкове значення якої приблизно дорівнює амплітуді відновлюваної напруги. Ця складова може бути контрольованим параметром для надійного визначення факту самогасіння дуги підживлення. Однак на вимірювальний пристрій надходить сигнал через коло елементів, які притлумлюють постійну складову. В цей час для вимірювання високої напруги застосовуються вимірювальні трансформатори, які переважно орієнтовані на діапазон частот близьких за значенням до промислової, а передача на вторинну сторону постійної складової викликає помітні труднощі. Незважаючи на те, що постійна складова в загальному випадку не трансформується на вторинну сторону, вона виникає на короткий час після самогасіння вторинної дуги. Тривалість її існування визначається переважно часом насичення магнітопроводу трансформатора напруги. Зазвичай час насичення магнітопроводу сучасних електромангітних трансформаторів напруги (ЕМТН) становить кілька періодів промислової частоти [3, 4].

Спосіб реалізується так: після подачі команди на відключення лінійних вимикачів пошкодженої фази на ній через два періоди промислової частоти за допомогою електромагнітних вимірювальних трансформаторів напруги та аварійних цифрових реєстраторів вимірюють напругу (ui) в кінці лінії. У міру надходження вимірювальних даних в систему ОАПВ на ковзному часовому відрізку (у часовому вікні), рівному періоду промислової частоти, безперервно обчислюють середнє значення напруги (ucp) на відключеній фазі ЛЕП, а також амплітуду основної гармонійної скла-

дової промислової частоти напруги (u~). Обчислення напруг u~ і ucp виконують за допомогою застосування прямого дискретного перетворення Фур'є. Далі на основі одержуваних розрахункових даних (ucp і u~) обчислюють відношення середньої виміряної напруги до амплітуди основної гармонійної складової:

$$K = \frac{u_{\text{ср}}}{u\sim}$$

Сигнал K обробляють лінійним цифровим фільтром нижніх частот (ЛЦФНЧ) 1-го ... 2-го порядку [2] з частотою зрізу в 3-4 рази меншою за промислову. В час, коли на виході ЛЦФНЧ модуль обробленого сигналу K перевищить порогове значення, тобто виконається умова K>0.5, відзначають факт гасіння дуги підживлення на основі появи постійної складової в напрузі відключеної фази і фіксують час tгас. Після встановлення факту гасіння з тимчасовою затримкою tдеіон = 200 мс відключеної фази (рис. 1).

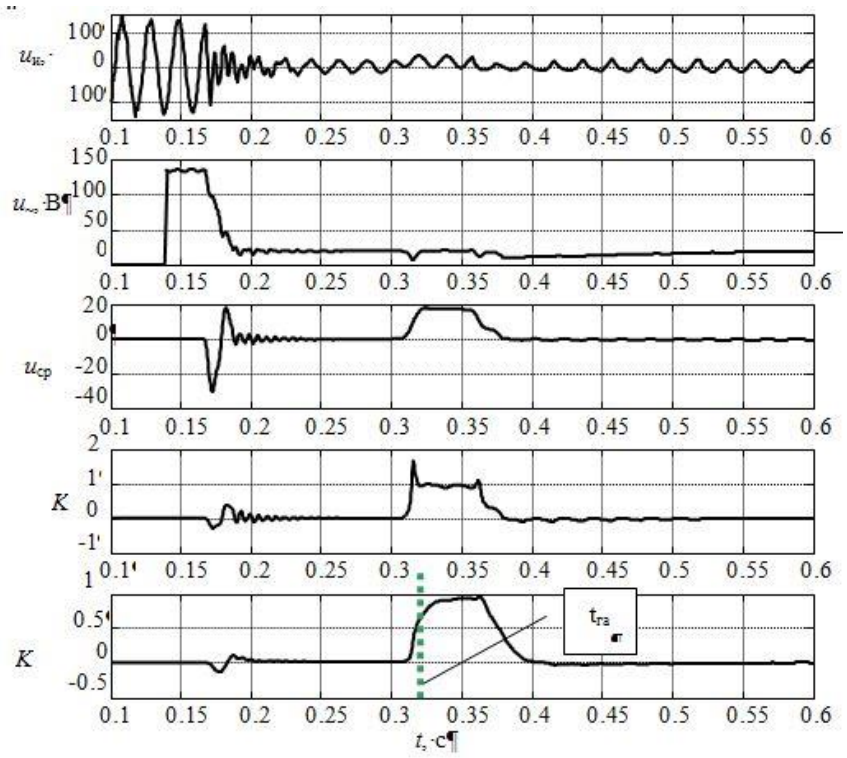


Рис. 1

Висновок. Розроблено спосіб адаптивного ОАПВ для ЛЕП, заснований на виділенні постійної складової у відновлюваній напрузі на відключеній фазі після гасіння дуги підживлення, який не має зон нечутливості по куту передачі потужності.

ПОСИЛАННЯ

1. Кузнецов В. Г., Тугай Ю. І., Кучанський В. В. Анормальні перенапруги в магістральних електричних мережах з джерелами спотворень. Одеса: Видавничий дім "Гельветика", 2025. 170 с. DOI: 10.35668/978-617-554-449-5
2. Тугай Ю., Кучанський В., Тугай І. Застосування керованих пристроїв компенсації зарядної потужності ЛЕП НВН в електричних мережах. Технічна електродинаміка. 2021. № 1. С. 53–56.
3. Кучанський В., Малахатка Д. Оцінювання впливу несиметрії лінії електропередавання надвисокої напруги на визначення параметрів компенсаційного реактора. Праці інституту електродинаміки національної академії наук України. 2020. № 57. С. 15. DOI: https://doi.org/10.15407/publishing2020.57.015
4. Mestas, P. Implementation and Performance Evaluation of a Reclosing Method for Shunt Reactor-Compensated Transmission Lines / P. Mestas, M.C. Tavares, A.M. Gloe. IEEE trans. on power deliv. 2011. Vol. 26, № 2. P. 954–962.

УДК 620.92:621.311.29

АНАЛІЗ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ПРОЦЕСІВ У РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Ю. І. Тугай, І. Ю. Тугай, Л. Р.Сабарно, І. М. Севастюк

Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, м. Київ, 03157, Україна,
тел.: (050) 387-89-42, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

Проаналізовано феморезонансні процеси в електричних розподільних мережах з відновлюваними джерелами енергії. Розроблено математичні моделі трансформаторів напруги, побудовані на геометрії їх магнітних систем та характеристиці намагнічування електротехнічної сталі, а не на експериментальних кривих намагнічування.

Ключові слов: *феморезонанс, крива намангічування, субгармоніки, трансформатор напруги.*

FERRORESONANCE ANALYSIS OF PROCESSES IN ELECTRICAL DISTRIBUTION NETWORKS

Yu. Tuhai, I. Tuhai, L. Sabarno, I. Sevastiuk

Institute of Electrodynamics, NAS of Ukraine, 56 Beresteysky Ave., Kyiv, 03157, Ukraine,
tel.: (050) 387-89-42, e-mail: kuchanskiyvladislav@gmail.com

Ferroresonance processes in electrical distribution networks with renewable energy sources have been analyzed. Mathematical models of voltage transformers have been developed, based on the geometry of their magnetic systems and the magnetization characteristics of electrical steel, rather than on experimental magnetization curves.

Keywords: ferroresonance, magnetization curve, subharmonics, voltage transformer.

ORCID: [1]000-0002-0704-1863; [2]0000-0002-7261-4277, [3]0000-0002-2153-2183, [4]0000-0003-1971-3345

З упровадженням в Україні заходів, передбачених Директивою Європейського Парламенту та Ради ЄС 2009/28/ про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії та згідно з Енергетичною стратегією на період до 2035 року відбувається зростання будівництва сонячних та вітроелектричних станцій. Розвиток відновлюваної енергетики є одним з важливих інструментів гарантування енергетичної безпеки держави. Як відомо, феморезонансні явища є причиною значної кількості аварій, що призводять до ушкодження обладнання, і вимагають великих втрат часу й засобів на ліквідацію наслідків аварій [1].

Феморезонанс – складне нелінійне електричне явище, питання захисту від якого досі залишається остаточно не вирішеним. Це явище є надзвичайно небезпечним для електротехнічного обладнання, оскільки призводить до виникнення як перенапруг, так і надструмів. До феморезонансів відносять коливальні процеси, які виникають в електричних ланцюгах, що містять нелінійну індуктивність (магнітопроводи трансформаторів). Феморезонанс у розподільних електричних мережах створює гармоніки та субгармоніки, надмірне нагрівання ізоляції та потенційні пошкодження трансформаторів. Незважаючи на небезпеку феморезонансу, сучасні дослідження зосереджені на його появі та впливі на розподільні електричні мережі. У цьому дослідженні розглядається можливість виникнення феморезонансу в трансформаторах з акцентом на насичення осердя, гармонічні спотворення та вплив ємності градуювання за різних умов експлуатації. Аналіз режимів трансформаторів на різних рівнях напруги (від 50 до 500 В) і гармонік у конфігураціях «трикутник» (1,12 Ом) і «зірка-земля» (1,53 Ом) вказує на критичну роль конструкцій трансформатора, які унеможливлюють феморезонанс. Висновки показують, що збільшення ємності з 90 до 1550 пФ значно підвищило масимальне значення напруги та струм після операцій перемикання на підстанціях; коли пікова напруга зросла з 0,420 до 2,400 кВ, тоді як сила струму зросла з 28 до 103 А; THD напруги зросла з 6,5 до 35,5 %, тоді як THD струму зросла з 7,8 до 40,2 %. Результати підкреслюють оптимізовану конструкцію трансформатора, зокрема за допомогою фільтрації гармонік і керування градуюванням ємності, що важливо для пом'якшення феморезонансу. Конструкції зі з'єднанням обмотки у трикутник демонструють менші ризики феморезонансу, ніж зіркоподібні типи обмоток, що підсилює важливість конфігурацій обмоток.

Зазвичай ВДЕ безпосередньо формують змінювану в широкому діапазоні постійну напругу [1–4]. Для забезпечення електромагнітної сумісності ВДЕ з електричними мережами змінного струму загального призначення використовують інвертори напруги з різними схемами та принципами дії. Зрозуміло, що для роботи зі стандартним електротехнічним обладнанням доцільним є використання і стандартних номінальних напруг: 0,4 кВ для живлення окремих об'єктів та 10 кВ для під'єднання до підвищувальних підстанцій зв'язку з енергосистемою. В останньому випадку передача електричної енергії від базових інверторних комірок до підстанції, яка підключена до енергосистеми, відбувається по мережі 10 кВ з ізольованою нейтраллю. Як відомо з досвіду експлуатації таких мереж, переважним видом пошкодження в них є однофазні замикання на землю, що становлять 70–80 % усіх видів пошкоджень. Осно-

вною перевагою мереж з ізольованою нейтраллю вважається можливість роботи при цьому без необхідності негайного відключення пошкодженого приєднання. Виявлення анормального режиму однофазного замикання в мережах з ізольованою нейтраллю здійснюється за допомогою трансформаторів напруги (ТН) контроль ізоляції. На жаль, характерною особливістю роботи цих ТН в мережах є їх висока аварійність. Вони працюють в режимі, близькому до режиму холостого ходу і являють собою нелінійну індуктивність, підключену між фазою і землею. У разі різного роду перехідних процесів, а також асиметрії та несинусоїдності напруг, що характерно для інверторів, у коливних контурах, які утворені ємністю мережі й нелінійною індуктивністю ТН, часом збуджуються феророзонансні коливання. Використано комплексний аналітичний підхід до моделювання режимів роботи розподільних електричних мереж в умовах феророзонансу [3, 4].

Такий підхід інтегрував методи аналізу перехідних процесів у нелінійних колах, які включають: лінійний резистор (R), шунтуючу ємність (C), а також лінійні (L) і нелінійні котушки індуктивності (L_NL). Використовуючи закони Кірхгофа, методологія об’єднала моделювання за допомогою програмного забезпечення Ferroview та експериментальних установок для визначення характеристик пасивних нелінійних елементів і прогнозування явищ феророзонансу, тим самим покращуючи розуміння природи феророзонансу; і його стратегії пом'якшення.

Моделювання системи розподілу в умовах феророзонансу

Розглянемо феророзонансний контур на рис. 1, який представляє розподільчу мережу змінного струму низької напруги. Систему можна змоделювати як лінійний резистор (R), шунтову ємність (C) для представлення ємності системи і послідовної лінійної індуктивності (L), а також нелінійної індуктивності (L_NL) для моделювання стального осердя.

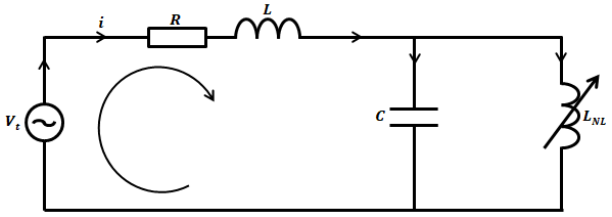


Рис. 1

Моделювання пасивних нелінійних елементів у системах розподілу електроенергії

У цьому розділі характеристика та прогнозування явищ феророзонансу в розподільних електричних мереж тісно пов’язані з характеристикою пасивних нелінійних елементів у системах розподілу електроенергії [3, 4]. Пасивні нелінійні елементи включають нелінійні індуктивності (NI) (зокрема, досліджуваний трансформатор і пов’язану з ним індуктивність системи), ємності та опори (що представляють різні форми опорів мережі).

Після того як модель для аналізу системи розподілу сформульована, залишається охарактеризувати кожен елемент. Одним з ключових аспектів моделювання цих нелінійних елементів є фіксація взаємозв’язку між магнітною індукцією (b) і напруженістю поля (h). Моделювання цього зв’язку є життєво важливим для аналізу та прогнозування явищ феророзонансу. Це дозволяє охарактеризувати магнітні характеристики та їх вплив на динаміку системи, полегшуючи ідентифікацію та пом’якшення потенційних проблем феророзонансу.

Висновки. За умов експлуатації силового трансформатора з ізольованою нейтраллю неповнофазний режим у разі обриву фази або відмови полюса вимикача, що призводить до феророзонансу в трансформаторі напруги типу НКФ на вимкненій фазі (поява «зміщення нейтралі» силового трансформатора). За цих умов можуть виникнути значні перенапруги і струми в обмотці високої напруги трансформатора, напруги можуть досягти одиниць ампер. Показано, що за умов роботи трансформатора напруги типу НАМИ в режимі зміщення нейтралі силового трансформатора запобігання феророзонансу неможливе на частоті 50 Гц.

ПОСИЛАННЯ

1. Кузнецов В. Г., Тугай І. Ю., Мельничук В. А Вплив явища гістерезису на виникнення нетрадиційних феророзонансних процесів у електричних мережах. Праці Інституту електродинаміки Національноїакадемії наук України. 2015. Вип. 40. С. 34–38.
2. Тугай І. Ю. Визначення наявності умов виникнення феророзонансного процесу в електричних мережах високої напруги / І. Ю. Тугай. Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. 2014. Вип. 39. С. 9–12.
3. Кузнецов В. Г. Аналіз феророзонансних процесів в розподільчому пристрої підстанції високої напруги за допомогою методів нелінійної динаміки / В. Г. Кузнецов, І. Ю. Тугай // Технічна електродинаміка (Темат. вип. «Силова електроніка та енергоефективність»). – 2012. – Ч. 3. – С. 33 – 34..
4. Engdahl, G. (2017). Ferroresonance in Power Systems: Literature Study. Energiforsk AB (Accessed online). Retrieved from: https://energiforskmedia.blob.core.windows.net/media/23470/ferroresonance.

УДК 621.316

ВПРОВАДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТЕХНОЛОГІЇ БЛОКЧЕЙН У МЕРЕЖАХ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

О. С. Яндульський[1], А. А. Марченко[2], В. С. Гулий[3], Р. М. Татусь[4]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
кафедра автоматизації енергосистем,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (044) 454-93-08, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net

Розглянуто впровадження технології блокчейн у досліджуваному фрагменті енергосистеми з відновлюваними джерелами енергії. Було створено автоматизовану систему управління генерацією та розподілом електроенергії за допомогою реалізації смарт-контрактів.

Ключові слова: *управління та розподіл електроенергії, блокчейн, смарт-контракт, алгоритм, вітрова та сонячна енергетика.*

IMPLEMENTATION OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY ELEMENTS IN DISTRIBUTED GENERATION NETWORKS

O. Yandulskyi[1], A. Marchenko[2], V. Hulyi[3], R. Tatus[4]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
the department of power systems automation
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (044) 454-93-08, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net

The implementation of blockchain technology in the studied fragment of the power system with renewable energy sources was considered. An automated system for managing the generation and distribution of electricity was created through the implementation of smart contracts.

Key words: *electric power management and distribution, blockchain, smart contract, algorithm, wind and solar energy.*

ORCID: [1]0000-0002-0362-7947; [2]0000-0003-2092-4107; [3]0000-0002-2145-4082; [4]0009-0004-9777-6450.

Об'єднана енергосистема України проходить шлях значних змін, спрямованих на інтеграцію з Європейською мережею ENTSO-E [1]. Це об'єднання є важливим внеском у стабільність і надійність ОЕС України, а також поштовхом до розвитку ринку електроенергії в Україні. На цьому тлі особливого значення набуває розвиток розумних мереж, які дозволяють ефективніше управляти енергетичними ресурсами, оптимізувати втрати й підвищувати надійність постачання електроенергії. Одним з ключових інструментів, що сприяють розвитку розумних мереж, є технологія блокчейн. Блокчейн забезпечує децентралізоване прозоре та захищене управління даними в різних сферах, ці аспекти є надзвичайно важливим для сучасних енергосистем, а використання смарт-контрактів на основі технології блокчейн відкриває нові можливості для автоматизації та оптимізації процесів управління енергосистемою. Цей підхід дозволяє підняти на новий рівень автоматизацію розподілу потужності в енергосистемі, підвищити безпеку та надійність транзакцій у мережі, а також збільшити рівень довіри до прозорого та децентралізованого енергетичного ринку.

Сучасні енергосистеми, зокрема «розумні мережі» (smart grids), передбачають інтеграцію децентралізованих енергетичних джерел, як-от сонячні батареї та вітрові турбіни, а також технологій для моніторингу енергії та управління нею в реальному часі. Вони використовують інноваційні методи для зменшення втрат енергії, підвищення ефективності та покращення стабільності системи. Однією з основних переваг сучасних енергосистем є їх здатність адаптуватися до змінних умов і швидко реагувати на зміни попиту та пропозиції енергії [2]. Використання блокчейну дозволяє створювати децентралізовані енергетичні ринки, де виробники та споживачі енергії можуть взаємодіяти без посередників, що знижує витрати на транзакції та підвищує ефективність ринку. Смарт-контракти на основі блокчейну автоматизують виконання угод, забезпечуючи миттєву оплату та обробку транзакцій і зменшують адміністративні витрати та усувають необхідність у довірених посередниках [3].

У дослідженні було вибрано фрагмент енергосистеми (рис. 1), який складається зі споживачів, вітрової, сонячної та газотурбінної електричних станцій, а також ліній зв'язку із зовнішньою енергосистемою.

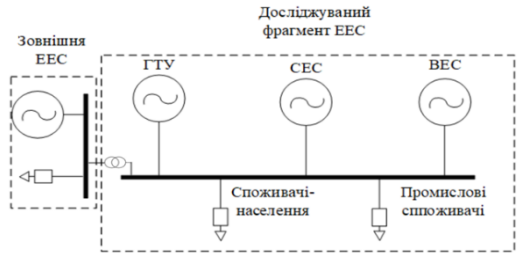


Рис. 1. Фрагмент досліджуваної енергосистеми

В процесі дослідження був розроблений алгоритм роботи смарт-контракту, який описує послідовність виконання розрахунків над вхідним даними, а також роботу деяких допоміжних функцій, що забезпечують введення та виведення даних в алгоритм смарт-контракту. Аналіз найпоширеніших блокчейн-платформ [4] показав доцільність використання Ethereum, оскільки це найбільш підтримувана платформа для смарт-контрактів, яка має велику екосистему та велику кількість розробників, що забезпечують надійність та постійну підтримку. Смарт-контракт було розроблено з використанням мови програмування Solidity в середовищі Remix IDE. Для зв'язку зі смарт-контрактом було створено вебзастосунок у вигляді HTML-файлу, який виконується в браузері, що підтримує WEB-3.

Було досліджено 3 режими роботи розглянутого фрагмента енергосистеми: ізольований режим та режим паралельної роботи із зовнішньою енергосистемою (з надлишком та дефіцитом потужності). На рис. 2 представлені графіки добового розподілу потужності у досліджуваній енергосистемі та покриття піків, взаємодії із зовнішньою мережею, обмеження генерації й споживання та їх балансування.

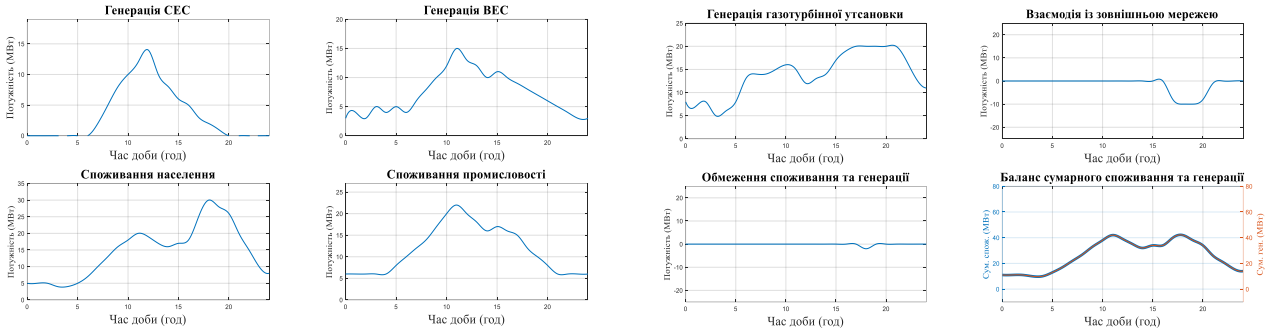


Рис. 2. Графіки потужностей досліджуваного фрагмента енергосистеми

Аналіз результатів показав, що протягом доби генерація СЕС та ВЕС залишається стабільною, тоді як споживання населення та промисловості має характерні пікові значення. Взаємодія із зовнішньою мережею забезпечує необхідний баланс у моменти, коли власної генерації не вистачає, алгоритм коректно відпрацьовує при різних режимах роботи фрагмента енергосистеми і правильно розподіляє потужність та забезпечує дотримання встановлених лімітів потужності споживання та генерації, що підтверджує ефективність використання запропонованого підходу та розробленого алгоритму роботи смарт-контракту.

Висновки. Проведений аналіз дослідження показав ефективність впровадження блокчейн-технологій. Смарт-контракти здатні автоматизувати розподіл виробленої електроенергії з ВДЕ локально, що дозволить суттєво оптимізувати процес розподілу електроенергії та забезпечити пряму взаємодію між постачальниками та споживачами електроенергії, а також мінімізувати участь посередників та оптимізувати адміністративні витрати.

ПОСИЛАННЯ

1. O. Yandulskyi, A. Marchenko and V. Hulyi, "Analysis of Efficiency Of Primary Load-Frequency Control of Integrated Power System of Ukraine," 2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS), Kharkiv, Ukraine, 2018, pp. 244-247, doi: 10.1109/IEPS.2018.8559567.
2. Ramachandran, A., Kantarcioglu, M. Using Blockchain and Smart Contracts for Secure Data Provenance Management. The University of Texas At Dallas, 2017.
3. Kirli, D., Couraud, B., Robu, V., Salgado-Bravo, M., Norbu, S., Andoni, M., Antonopoulos, I., Negrete-Pincetic, M., Flynn, D., & Kiprakis, A. Smart contracts in energy systems: A systematic review of fundamental approaches and implementations. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022.
4. Hewa, T. M., Hu, Y., Liyanage, M., Kanhare, S. S., & Ylianttila, M. Survey on Blockchain-Based Smart Contracts: Technical Aspects and Future Research. IEEE Access, 2021.

УДК 536.24:533

ОСОБЛИВОСТІ ПРІОРИТЕТІВ І ПРАКТИК ЕНЕРГЕТИЧНОЇ, ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА КЛІМАТИЧНОЇ БЕЗПЕКИ

Н. М. Фіалко[1], М. П. Тимченко[2], Ю. В. Шеренковський[3], Н.О. Меранова[4]

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (066) 735-95-78, e-mail: nmfialko@ukr.net

Наводяться результати аналізу триетапної еволюції концепції безпеки енергозабезпечення, яка за останні пів століття змінювалась від енергетичної до екологічної і далі до кліматичної безпеки.

Ключові слова: *енергетична безпека, екологія, клімат, енергозабезпечення, декарбонізація*

FEATURES OF PRIORITIES AND PRACTICES OF ENERGY, ENVIRONMENTAL AND CLIMATE SECURITY

N. Fialko[1], M. Tymchenko[2], Ju. Sherenkovskii[3], N. Meranova[4]

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
2a Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (066) 735-95-78, e-mail: nmfialko@ukr.net

The results of the analysis of the three-stage evolution of the concept of energy supply security are presented, which over the past 50 years has changed from energy to environmental and further to climate security.

Key words: *energy security, ecology, climate, energy supply, decarbonization*

ORCID: [1]0000-0003-0116-7673; [2]0000-0003-4426-713X; [3]0000-0003-1765-7319;[4]0000-0001-7223-8753.

Зміцнення енергетичної безпеки належить до першочергових завдань відбудови й модернізації енергетичної системи України. З огляду на це актуальним є аналіз зміни з плином часу пріоритетів і практик енергетичної безпеки.

Метою роботи є аналіз різних аспектів еволюції концепції енергетичної безпеки в контексті зміни «джерельної бази» (первинних енергоносіїв), технологічних укладів тощо.

Наводяться результати аналізу концепнії безпеки енергозабезпечення, яка протягом останніх 50 років змінювалась від енергетичної до екологічної і далі до кліматичної безпеки. Відмічається, що вказані етапи еволюції вирізняються за такими ознаками, як базова «джерельна база» (первинні енергетичні ресурси), технологічний уклад тощо. Першому етапу – енергетичній безпеці – відповідають паливні ресурси «первісної» біоенергетики, другому – екологічній безпеці – викопні палива, матеріали, що розщеплюються, та обмежено відновлювані джерела енергії, третьому – кліматичній безпеці – поступово, переважно відновлювані джерела енергії. Ланцюг триетапної еволюції концепції безпеки енергозабезпечення безпосередньо пов'язаний з порядком зміни технологічних укладів від індустріального до постіндустріального та сучасного інформаційного.

Розглядаються особливості пріоритетів і практик енергетичної, екологічної та кліматичної безпеки. Енергетична безпека аналізується як критична умова розвитку економіки на індустріальному етапі. Вказується на досить швидке порушення на цьому етапі екологічної рівноваги в біосфері, що спричинилося через тенденцію до вичерпування енергоресурсів та зростання антропогенного навантаження на навколишнє середовище.

Висвітлюється специфіка трансформації екологічної безпеки на другому етапі вищевказаної еволюції та особливостей її впливу на світову економіку в контексті боротьби за екологічну чистоту виробництва і споживання енергії. Акцентується увага на виникненні в межах концепції екологічної безпеки ідеї «енергетичного» переходу, що наразі є головним інструментом декарбонізації енергетики й економіки в цілому.

Розглядаються особливості кліматичної безпеки в контексті сучасного глобального потепління. Відмічається яскраво виражений «антропоцентризм» концепції кліматичної безпеки, тобто робиться акцент на врахуванні вразливості власне людини та її інституцій. Вказується на необхідність поглиблених досліджень кліматичної безпеки, насамперед щодо моделювання наслідків змін клімату.

Зазначається, що соціально-економічні та екологічні втрати, пов’язані з глобальним потеплінням, можуть набагато перевищити витрати на запобігання його наслідкам.

УДК 536.24:533

СУЧАСНЕ ГЛОБАЛЬНЕ ПОТЕПЛІННЯ Й ЕНЕРГЕТИЧНИЙ, ЗЕЛЕНИЙ ТА ЦИФРОВИЙ ПЕРЕХІД

Н. М. Фіалко[1], М. П. Тимченко[2], Ю. В. Шеренковський[3], Н. О. Меранова[4]

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (066) 735-95-78, e-mail: nmfialko@ukr.net

Наводяться результати аналізу специфіки сучасного глобального потепління та особливостей реалізації енергетичного, зеленого та цифрового переходів.

Ключові слова: *глобальне потепління, кліматична нейтральність, енергетичний, зелений та цифровий перехід*

MODERN GLOBAL WARMING AND THE ENERGY, GREEN AND DIGITAL TRANSITION

N. Fialko[1], M. Tymchenko[2], Ju. Sherenkovskii[3], N. Meranova

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
2a Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (066) 735-95-78, e-mail: nmfialko@ukr.net

The results of the analysis of the specifics of modern global warming and the features of the implementation of energy, green and digital transitions are presented.

Key words: *global warming, climate neutrality, energy, green and digital transition*

ORCID: [1]0000-0003-0116-7673; [2]0000-0003-4426-713X; [3]0000-0003-1765-7319;[4]0000-0001-7223-8753.

Поступ України до кліматичної нейтральності безпосередньо пов'язаний з реалізацією енергетичного, зеленого та цифрового переходів. При цьому вказані переходи відбуваються в контексті протидії небажаним змінам клімату, які спричиняються сучасним глобальним потеплінням.

Мета роботи полягає в аналізі особливостей сучасного глобального потепління та потрійного енергетичного, зеленого і цифрового переходу як інструменту досягнення кліматичної нейтральності.

Основні особливості сучасного глобального потепління. В останні приблизно пів століття основною тенденцією зміни клімату став феномен сучасного глобального потепління, яке має такі основні особливості. По-перше, на відміну від усіх попередніх змін клімату, які неодноразово відбувалися в ході геологічної історії Землі, воно характеризувалося надзвичайно швидкою зміною глобального клімату. Крім того, вказане потепління відбувається з прискоренням, починаючи з 60-х років минулого століття. І, по-друге, основною причиною теплових аномалій сучасної зміни клімату у форматі глобального потепління є антропогенний імпакт-фактор у вигляді неухильно зростаючих щорічних концентрацій парникових газів. Вказане зростання є супутнім результатом прогресу світової економіки у XX-XI століттях. Отже, сучасне потепління є переважно антропогенним, а не природним явищем, і його ключовим драйвером є радіаційний форсинг парникових газів.

Енергетичний, зелений і цифровий перехід. Реалізація трьох вказаних взаємозумовлених та взаємозалежних переходів безпосередньо повязана з досягненням кліматичної нейтральності. Разом ці переходи складають цілосну соціально-економічну сутність, урахування закономірностей зміни якої має сприяти розвитку чистого і сталого виробництва енергії. Цілями енергетичного переходу є не тільки мінімізація проблем, які виникають при енергозабезпеченні різних секторів економіки, але і їх декарбонізація за умов загрози кліматичної кризи. Зеленим переходом передбачається як реалізація стратегії розвитку стійкої та екологічно чистої енергетики, так і вирішення проблем сучасного антропогенного глобального потепління. В ЄС основні положення зеленого переходу викладено в «Зеленій угоді», де визначено відповідні юридичні зобов'язання, граничні показники емісії шкідливих викидів, часові горизонти та ін. Щодо цифрового переходу, то він визначає всебічну інтеграцію цифрових технологій (IT, ICT, IoT, AI) включно з соціальними мережами. Без реалізації цифрового переходу практично неможливим є досягнення цілей декарбонізації різних секторів економіки, запровадження механізмів інтерналізації зовнішніх витрат тощо.

Вказані три переходи відбуваються когерентно і в сукупності утворюють своєрідний потрійний перехід, що слугує подоланню відповідних трьох викликів на шляху досягнення кліматичної нейтральності.

УДК 621.311

СТАН НОРМАТИВНО-ПРАВОВОЇ БАЗИ У СФЕРІ ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ «ЗЕЛЕНИХ» ГІБРИДНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

О. О. Рубаненко, Я. М. Коваленко

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (050) 3805201, e-mail: triyarko@gmail.com

Технології комбінованого (гібридного) використання різних відновлюваних джерел. Аналіз переваг «зелених» гібридних електростанцій з ВДЕ в Україні. Дослідження потенціалу та розроблення відповідної законодавчої бази для будівництва та експлуатації «зелених» гібридних електростанцій з ВДЕ.

Ключові слова: *гібридні електростанції, відновлювані джерела, розподілена генерація, законодавча база.*

STATE OF THE LEGAL AND REGULATORY FRAMEWORK IN THE FIELD OF "GREEN" HYBRID POWER PLANTS

O. Rubanenko, Y. Kovalenko

Institute of Renewable Energy Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
50 Metrologichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (050) 3805201, e-mail: triyarko@gmail.com

Technologies for the combined (hybrid) use of various renewable energy sources. Establishing the foundation for the development of "green" hybrid power plants based on renewable energy sources (RES) in Ukraine. Research on potential and development of the relevant legislative framework for the construction and operation of "green" hybrid RES power plants.

Key words: *hybrid power plants, renewable energy sources, distributed generation, legislative framework.*

ORCID: 0009-0000-2143-7795

Передісторія та загальний огляд

Використання відновлюваних джерел енергії важливе як в національному, так і міжнародному масштабі з погляду реакції на глобальні кліматичні зміни та покращення енергетичної безпеки в Європі.

Автономні системи відновлюваних джерел енергії ненадійні через непостійну доступність та зміни кліматичних умов. Згідно з останніми звітами IEA та IRENA, останнім часом у світі стрімко зростає встановлена потужність відновлюваних джерел енергії, особливо таких як автономні вітрові (ВЕС) та сонячні системи (СЕС). ВЕС та СЕС мають нерівномірний графік генерування електроенергії, тому не можуть бути безперервним гарантованим джерелом енергії в режимі офф-грід без додаткового обладнання. Очевидно, що система з комбінацією двох або більше відновлюваних джерел енергії ефективніша, ніж система з одним джерелом з погляду ціни й надійності. Така система називається гібридною відновлюваною енергетичною системою (ГВЕС) і стає елементом ринку, який найшвидше розвивається в усьому світі. У країнах Європейського Союзу ця система дедалі набуває поширення та закріплюється на законодавчому рівні. Як результат, використання вітрової та фотоелектричної генерації енергії стає реальністю.

Гібридизація сприяє підвищенню надійності системи ВДЕ, однак передбачає оптимальний вибір джерел енергії та технологій їх відбору, що буде визначати методологію проєктування таких систем для покращення експлуатаційних характеристик, розв’язання задач диспетчеризації й керування. Різні джерела генерації можуть сприяти одне одному в досягненні більш високої енергетичної ефективності і/або поліпшувати функціонування.

Саме розвиток гібридних систем надає можливість використовувати відновлювані джерела в різних комбінаціях заради досягнення економічної незалежності. «Зелена» гібридна електростанція може мати різну конфігурацію на основі доступних технологій: сонце, вітер, біомаса, мала гідроенергетика, геотермальна енергія. Але загалом комбінація генерування електроенергії ВЕС та СЕС стає дедалі найпопулярнішим рішенням у всьому світі. Як було зазначено, генерування СЕС активне вдень, проте вночі виробництво СЕС падає до нуля. Генерування ВЕС змінюється

протягом доби, що дозволяє різним технологіям генерування збалансовувати одна одну. Також в таких електростанціях часто використовуються установки зберігання енергії (УЗЕ), які підвищують надійність роботи електростанцій і можуть надавати допоміжні послуги енергетичній системі: балансування та вирівнювання частоти.

Такі електростанції можна будувати в будь-якому масштабі: і для потреб підприємства, і для постачання електроенергії до регіональної чи національної мережі. Належним чином налаштована гібридна електростанція гарантує високий рівень надійності та безпеки постачання електроенергії, що критично важливо в українських реаліях.

Використання гібридних електростанцій також значно зменшує фізичне навантаження на системного оператора шляхом забезпечення прогнозованої і стабільного генерування електроенергії. Це відбувається завдяки використанню власного ресурсу для балансування, що значно зменшує кількість обмежень роботи об'єктів ВДЕ.

Можливість оптимізувати використання енергомережі відрізняє гібридні електростанції від звичайних. Ця оптимізація досягається через використання однієї точки для приєднання об'єкта до енергомережі замість, наприклад, двох, якщо будувати і використовувати окремо сонячну і вітрову електростанції.

За умови використання, наприклад, сонячної та вітрової технологій на одному об'єкті значно підвищується й коефіцієнт використання встановленої потужності всього об'єкта.

Контрольований і прогнозований рівень генерування дає змогу побудувати довгострокову бізнес-модель та сприяє продажу електроенергії за корпоративними угодами купівлі-продажу (Corporate PPA), адже відкривається можливість повністю задовольняти погодинні енергетичні потреби підприємства.

Отже, «зелені» гібридні електростанції – це приклад взаємовигідної технології для всіх гравців енергетичного ринку: для держави, яка забезпечує свою енергетичну незалежність та стабільність енергосистеми; для виробника, який може побудувати тривалу успішну бізнес-стратегію; для споживача, який отримує доступ до чистої енергії, яка з часом буде дешевшати в умовах чесної конкуренції.

Переваги використання «зелених» гібридних електростанцій:

- зменшення фізичного навантаження на Оператора системи передачі (ОСП) шляхом забезпечення прогнозованого й стабільного генерування електроенергії;
- зменшення потреби для держави компенсувати невідпущену за командою ОСП електроенергію вироблену ВДЕ;
- значне скорочення капітальних витрат завдяки використанню спільної інфраструктури, ефективнішому використанню площ, розробці спільної проєктної документації;
- підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності всього об'єкта і ОЕС України.

Стан нормативно-правової бази у цій сфері правового регулювання

Наразі використання «зелених» гібридних електростанцій не передбачено в українському законодавстві. Ця технологія нова і юридично складна. Необхідні законодавчі напрацювання й розробка системи підтримки, щоб запровадити цю технологію в національний енергоринок.

Відповідне законодавство необхідне не лише для побудови «зелених» гібридних електростанцій, а й для трансформації наявних об'єктів ВДЕ.

Так, в Законі України «Про альтернативні джерела енергії» йдеться про окремі категорії об’єктів електроенергетики залежно від виду ВДЕ, але немає правових основ для функціонування «зелених» гідрибних електростанцій з одночасним зосередженням на них декількох видів генерації ВДЕ.

Цілі прийняття нормативно-правової бази у цій сфері

Збалансувати енергетичну систему, а саме «зелену» генерацію, шляхом використання «зелених» гібридних електростанцій, які стають дедалі поширенішими у світі. Забезпечення прогнозованого і стабільного виробітку електроенергії.

Цілі та дослідницькі питання

У довгостроковій (післявоєнній) перспективі широкомасштабний розвиток «зеленої» генерації та створення нової моделі енергетичного сектору України буде можливим, зокрема, за умови дослідження потенціалу та розроблення відповідної законодавчої бази для будівництва гібридних електростанцій з ВДЕ.

ПОСИЛАННЯ

1. Кодекс системи передачі, затверджено постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 309

2. Закон України про ринок електричної енергії, від 13.04.2017 № 2019-VIII

УДК 621.311

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ РЕЖИМУ СУЧАСНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

М. П. Болотний

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра відновлюваних джерел енергії, просп. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна, тел./факс +38(044)-204-82-33, e-mail: nickolai2007@gmail.com

У статті розглянуті питання забезпечення стійкості паралельної синхронної роботи в сучасних умовах функціонування електроенергетичних систем. На основі проведеного аналізу класифіковано задачі забезпечення стійкості, визначено критерії допустимості існування режиму в електроенергетичних системах. Застосування додаткових розрахунків стійкості в сучасних електроенергетичних системах з відновлюваними джерелами енергії дозволить оцінити вплив рівня проникнення технологій інтерфейсу силових електронних перетворювачів з метою задоволення вимог споживачів до надійності їх електропостачання та якості електроенергії.

Ключові слова: *стійкість, допустимість режиму, відновлюванні джерела енергії*

ENSURING THE STABILITY IN MODERN ELECTRICAL POWER SYSTEMS

M. Bolotnyi

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Department of Renewable Energy Sources, Prospect Beresteiskyi, 37, Kyiv 03056, Ukraine Tel. / Fax +38(044)-204-82-33, e-mail: nickolai2007@gmail.com

The article considers the stability issues of ensuring the parallel synchronous operation in modern conditions of electrical power systems. The tasks of stability ensuring based on analysis are classified, the criteria for mode admissibility in electrical power systems are defined. The use of additional stability calculations in modern electrical power systems with renewable energy sources will help to assess the impact penetration level of power electronic converter interface technologies in order to meet consumer requirements for reliability of their power supply and quality of electricity.

Keywords: *stability, mode admissibility, renewable energy sources.*

ORCID: 0000-0002-7366-2430

Однією з ключових проблем є забезпечення стійкості режиму електроенергетичних систем в умовах підвищеного навантаження та старіння парку електрообладнання. Підвищення надійності та стійкості енергосистем при виконанні задач проєктування нового будівництва, реконструкції, технічного переоснащення об'єктів енергосистем, експлуатації та протиаварійного керування енергосистемами потребують подальшого детального аналізу в умовах існуючої тенденції інтеграції інноваційних технологій на основі відновлюваних джерел енергії [1].

Нормативно-технічна документація у сфері електроенергетики України після синхронізації з енергооб'єднанням ENTSO-E повинна відповідати загальноєвропейським підходам до забезпечення стійкості енергосистем, а також враховувати [2]:

- майбутню інтеграцію об'єднаної енергосистеми України з об'єднанням енергетичних систем ЄС;
- підключення до електричної мережі ОЕС України нових потужностей відновлюваних джерел енергії;
- впровадження цифрових пристроїв вимірювання та реєстрації синхронізованих значень електричних параметрів режиму роботи електричної мережі;
- вимоги нормативних документів, що визначають правила роботи електроенергетичних систем країн континентальної Європи та України;
- досвід експлуатації ОЕС України.

На рис.1 представлено результати проведеного аналізу та класифіковано задачі забезпечення стійкості ЕЕС в сучасних умовах функціонування [3–6].

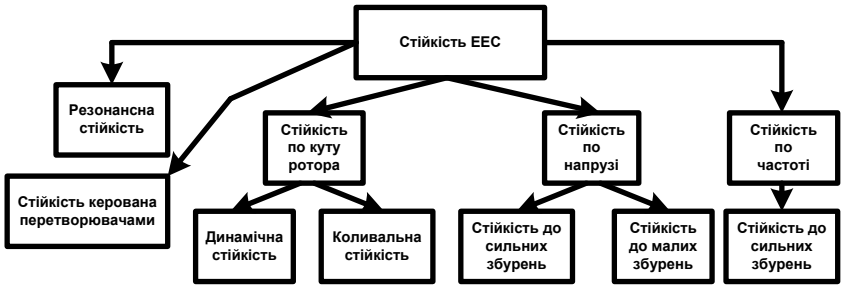


Рис. 1. Класифікація задач забезпечення стійкості ЕЕС

Для кожного отриманого аварійного стану ЕЕС перевіряється його допустимість з погляду існування електроенергетичного режиму. Допустимість режиму полягає у перевірці можливості його існування, стійкості та можливості динамічного переходу до післяаварійного стану ЕЕС.

Допустимість електроенергетичного режиму визначається за такими критеріями:

- існування визначається збіжністю ітераційного процесу розрахунку усталеного режиму роботи;
- перебування параметрів режиму в діапазоні гранично допустимих значень;
- статична стійкість режиму;
- динамічна стійкість переходу до післяаварійного режиму.

Отже, вирішення проблеми забезпечення стійкості паралельної синхронної роботи ОЕС України є однією з основних стратегічних цілей енергетичної безпеки України в умовах інтеграції до складу енергооб'єднання ENTSO-E.

ПОСИЛАННЯ

1. Lytvynchuk V., Kaplin M., Bolotnyi N., Karmazin O. Analysis of the Probable Decrease of Load Shedding Reserve in Power System of Ukraine at Installed Capacity of Renewable Energy Sources. IEEE 8th International Conference on ENERGY SMART SYSTEMS, 2022, Kyiv. Pp. 180–183.
2. Інтеграційний пакет у сфері електроенергетики https://ua.energy/yevrointegratsiya/integratsijnyj-paket-u-sferi-elektroenergetyky/ (дата доступу у 12.03.2025).
3. Кириленко О. В., Павловський В. В., Лук'яненко Л. М., Зорін Є. В. Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою. Технічна електродинаміка. 2010. № 3. С. 59–66.
4. Kyrylenko O., Pavlovskyi V., Lukianenko L., Steliuk A., Lenga O. Stability issues in modern power systems. Computational problems of electrical engineering. 2015. Vol. 5. No. 1. Pp. 23–32.
5. СОУ-Н МЕВ 40.1-00100227-68:2012. Стійкість енергосистеми. Керівні вказівки. Настанова. К.: Міністерство палива та енергетики України, 2012. 29 с.
6. Badrzadeh, B., Emin, Z., Gu, Y. (2024). Changing Power Systems and Impact on Power System Dynamic Phenomena and Analysis Methods. In: Badrzadeh, B., Emin, Z. (eds) Power System Dynamic Modelling and Analysis in Evolving Networks. CIGRE Green Books. Springer, Cham. Pp. 3–53. https://doi.org/10.1007/978-3-031-47821-5_1

УДК 519.87:620.9

АНАЛІЗ ТРЕНДУ ПОГОДИННОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ НА ОСНОВІ ЛІНІЙНОЇ МОДЕЛІ ЕКСПОНЕНЦІЙНОГО ЗГЛАДЖУВАННЯ

С. І. Ковтун[1], Ю. В. Куц[2], Б. Б. Млинко[3], М. Є. Фриз[4]

[1,2,4]Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна
[2]НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна
[3,4]Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, вул. Руська, 56, м. Тернопіль, 46001, Україна, тел.: +38(0352)519714, e-mail: [4]mykh.fryz@gmail.com

Обґрунтовано застосування методу аналізу трендової компоненти погодинного електроспоживання організації, що ґрунтується на використанні лінійної моделі експоненційного згладжування Голта. Отримано оцінки параметрів моделі для різних режимів роботи організації.

Ключові слова: *електроспоживання, енергетична інформатика, часовий ряд, аналіз, прогнозування, тренд, модель, експоненційне згладжування.*

TREND ANALYSIS OF HOURLY ELECTRICITY CONSUMPTION OF ORGANIZATION BASED ON EXPONENTIAL SMOOTHING LINEAR MODEL

S. Kovtun[1], Y. Kuts[2], B. Mlynko[3], M. Fryz[4]

[1,2,4]General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, 172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
[2]National Techn. University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Pr. Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
[3,4]Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 56 Ruska str., Ternopil, Ukraine, 46001
phone: +38(0352)519714, e-mail: [4]mykh.fryz@gmail.com

The application of the method of analysis of the trend components of the hourly electricity consumption of the organization, which is based on the use of a Holt's exponential smoothing linear model has been justified. Model parameters for different modes of operation of the organization have been obtained.

Key words: *electricity consumption, energy informatics, time series, analysis, forecasting, trend, model, exponential smoothing.*

ORCID: [1]0000-0002-8493-9474; [2]0000-0002-8493-9474; [3]0000-0003-0780-5365; [4]0000-0002-8720-6479.

Здійснення аналізу та прогнозування електроспоживання організацій є важливим для різноманітних задач оптимізації витрат на електроенергію, підвищення енергоефективності, планування бюджету та фінансового прогнозування, зменшення навантаження на електромережу, дотримання екологічних стандартів та вимог, автоматизації процесів управління енергоспоживанням тощо. Аналіз електроспоживання за допомогою інструментів енергетичної інформатики є ключовим напрямом у підвищенні енергоефективності, зниженні витрат і створенні екологічно сталих систем. При цьому вибір моделі, методів опрацювання та комп'ютерного імітаційного моделювання електроспоживання відіграє визначальну роль [1–3].

У доповіді здійснено обґрунтування моделі погодинного електроспоживання на основі його декомпозиції на трендову, циклічну [4] та шумову складові з урахуванням різних режимів роботи організації. Також здійснено аналіз трендової компоненти на основі методу експоненційного згладжування, який є простим і водночас ефективним методом аналізу та прогнозування часових рядів.

Методи експоненційного згладжування застосовуються в різноманітних задачах моделювання та прогнозування випадкових послідовностей. Експоненційне згладжування Голта використовується для прогнозування послідовностей з трендом. Як показано в [5], методи експоненційного згладжування є алгоритмами точкового прогнозування, в основі яких лежать відповідні моделі в просторі станів. У цій доповіді обґрунтовується можливість використання лінійної моделі експоненційного згладжування Голта з адитивними похибками для опису трендової компоненти для кожного режиму енергоспоживання. Очевидно, моделі тренду для різних режимів відрізнятимуться своїми параметрами. Лінійна модель у просторі станів для тренду $x_t(\omega)$, $\omega \in \Omega, t \in \mathbf{Z}$, отриманого внаслідок декомпозиції електроспоживання має такий вигляд:

$$x_t(\omega) = \ell_{t-1}(\omega) + b_{t-1}(\omega) + \varepsilon_t(\omega),$$
$$\ell_t(\omega) = \ell_{t-1}(\omega) + b_{t-1}(\omega) + \alpha\varepsilon_t(\omega),$$
$$b_t(\omega) = b_{t-1}(\omega) + \beta\varepsilon_t(\omega),$$

де $0 < \alpha < 1$, $0 < \beta < \alpha$ [5] – параметри моделі, $\varepsilon_t(\omega)$ – послідовність незалежних випадкових величин зі скінченною дисперсією $\mathrm{Var}(\varepsilon_t(\omega)) = \sigma_\varepsilon^2$.

У термінології методів експоненційного згладжування $\ell_t(\omega)$ має назву «level term», а $b_t(\omega)$ – «growth (slope) term». Автори [5] відносять наведену модель до класу моделей з єдиним джерелом похибок. Перший вираз являє собою рівняння спостережень, а два інші задають рівняння стану, причому похибка $\varepsilon_t(\omega)$ входить у всі три вирази. Узагальненням наведеної лінійної моделі є модель локально лінійного тренду [6], в якій передбачено наявність кількох джерел похибок. Модель експоненційного згладжування досить просто може бути поширеною для врахування нелінійної динаміки електроспоживання.

На основі моделі можна здійснювати точкове прогнозування трендової компоненти електроспоживання. Навіть більше, якщо обґрунтовано ймовірнісний розподіл похибки $\varepsilon_t(\omega)$ (у більшості випадків припускають, що цей розподіл є гауссівським), то можна здійснювати й інтервальне прогнозування.

Для використання моделі тренду на практиці необхідно задати значення дійсних параметрів α і β, а також початкові значення $\ell_0(\omega)$ та $b_0(\omega)$. Ці величини можна оцінити на основі даних вимірювань методом найменших квадратів або методом максимальної правдоподібності [5].

Отримано результати оцінювання параметрів моделі для різних режимів роботи організації. Отримані оцінки можна використовувати для задачі прогнозування локального тренду погодинного електроспоживання для відповідних режимів.

ПОСИЛАННЯ

1. В. П. Бабак, Ю. В. Куц, М. В. Мисловичˊ, М. Є. Фриз, and Л. М. Щербак, *Об'єктно-орієнтована ідентифікація стохастичних шумових сигналів*. Київ: Наук. думка, 2024. doi: https://doi.org/10.15407/978-966-00-1883-9.
2. V. Babak, A. Zaporozhets, S. Kovtun, Y. Kuts, M. Fryz, and L. Scherbak, "Information Provision for Monitoring the Current State of Electric Power Facilities," in *Advanced System Development Technologies I. Studies in Systems, Decision and Control*, M. Bezuglyi, N. Bouraou, V. Mykytenko, G. Tymchyk, and A. Zaporozhets, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 283–309. doi: 10.1007/978-3-031-44347-3_8.
3. L. M. Scherbak, M. Y. Fryz, and V. A. Hotovych, "Electricity consumption simulation using random coefficient periodic autoregressive model," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1254, no. 1, p. 12027, 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1254/1/012027.
4. Mykhailo Fryz and Leonid Scherbak, "Properties of discrete-time conditional linear cyclostationary random processes in the problems of energy informatics," *Syst. Res. Energy*, no. 1 (72), pp. 72–79, Apr. 2023, doi: 10.15407/srenergy2023.01.072.
5. R. J. Hyndman, A. B. Koehler, J. K. Ord, and R. D. Snyder, *Forecasting with Exponential Smoothing: The State Space Approach*. Berlin Heidelberg: Springer, 2008. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-540-71918-2.
6. J. Durbin and S. J. Koopman, *Time Series Analysis by State Space Methods*, Second. Oxford: Oxford University Press, 2012. doi: https://doi.org/10.1093/acprof:oso/9780199641178.001.0001.

УДК 620.92

ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ СТРУКТУР ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

О. І. Тесленко[1], Г.О. Тарасенко[2]

[1]Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: +38 (050) 223-40-07, e-mail: teslenko1961@gmail.com
[2]Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна
тел.: +38 (095) 393-29-13, e-mail: georgiitarasenko@icloud.com

Систематизовано основні технології розподіленої генерації для локальних енергетичних систем. Проаналізовано багатокрітеріальність оптимізації ефективності технологічних структур локальних енергетичних систем за напрямами: надійнйсть, економічність, екологічність.

Ключові слова: *локальна електроенергетична система, технологічна структура, багатокритеріальна оптимізація, ефективність, надійнйсть, економічність, екологічність.*

OPTIMIZATION OF TECHNOLOGICAL STRUCTURES OF LOCAL POWER SYSTEMS

O. Teslenko[1], G. Tarasenko[2]

[1]General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: +38(050) 223-40-07, e-mail: teslenko1961@gmail.com
[2]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Beresteyskyi Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine
phone: +38 (095) 393-29-13, e-mail: georgiitarasenko@icloud.com

The main technologies of distributed generation for local power systems are systematized. The multi-criteria optimization of the efficiency of technological structures of local power systems is analyzed in the following areas: reliability, economy and environmental friendliness.

Key words: *local power system, technological structure, multi-criteria optimization, efficiency, reliability, economy, environmental friendliness.*

ORCID: [1]0000-0002-3772-5991; [2]0009-0003-8413-2771.

Розвиток локальних енергосистем (ЛЕС) з використанням розподіленої генерації (РГ) є ключовим напрямом забезпечення енергетичної стійкості, особливо в умовах зростаючих викликів, пов'язаних з воєнною агресією, необхідністю диверсифікації джерел електропостачання та глобальними змінами клімату [1, 2]. На рис. 1 наведені основні апробовані технології РГ, які доцільно застосовувати у ЛЕС.

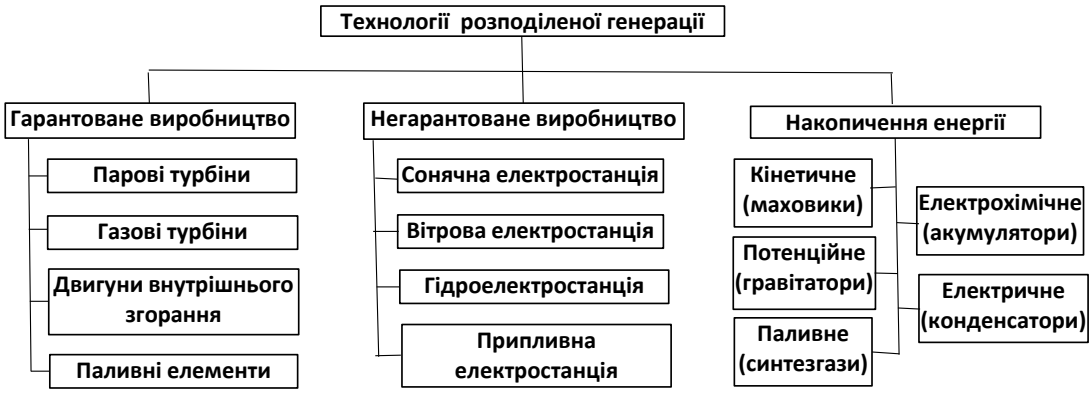


Рис. 1. Технології розподіленої генерації

Актуальність дослідження оптимізації ЛЕС зумовлена необхідністю підвищення ефективності використання ресурсів, інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та впровадження інноваційних підходів до управління ЛЕС. Розвиток сучасних ЛЕС супроводжується зростаючими вимогами до стабільності, гнучкості та економічної доцільності експлуатації, що зумовлює необхідність застосування багатокритеріальних методів оптимізації. Оптимізація ЛЕС може бути класифікована за кількома основними напрямами: надійність, економічність та екологічність (рис. 2). Коженіз цих напрямів має певні критерії та методи оцінки їх ефективності [3, 4].

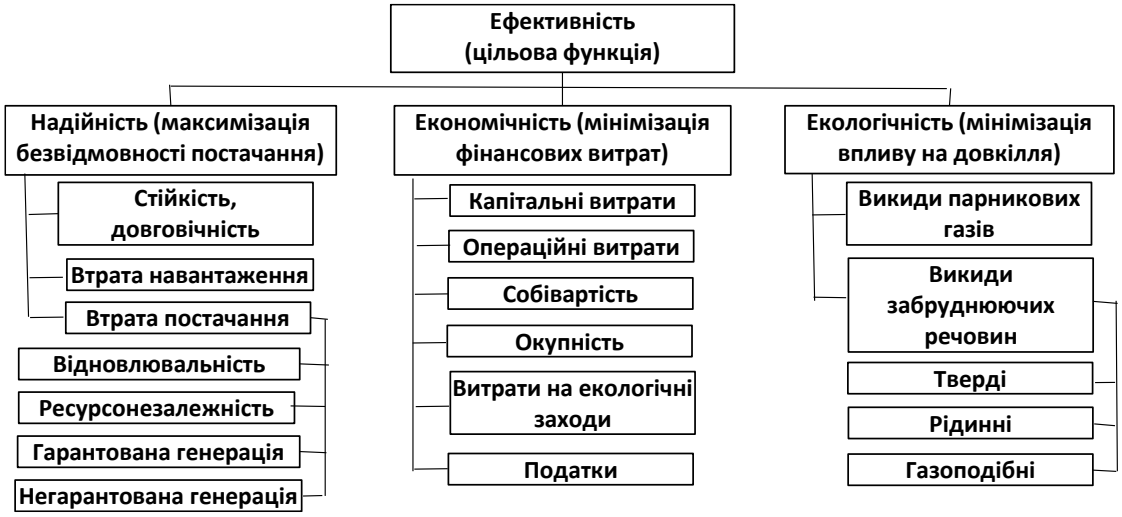


Рис. 2. Багатокритеріальність оптимізації ефективності ЛЕС

Оптимізація за показниками надійності. Оптимізація надійності має на меті підвищення стійкості ЛЕС до аварійних ситуацій та зменшення частоти відмов обладнання. Основні напрями включають: а) мінімізація ризиків виходу з ладу критичних елементів: використання методів оцінки надійності та аналізу відмов; б) оптимальне розподілення резервних потужностей: впровадження механізмів балансування енергопотоків; в) автоматизоване керування режимами роботи: інтеграція алгоритмів штучного інтелекту для прогнозування порушень роботи ЛЕС та запобігання їм; г) оптимізація графіків обслуговування обладнання: розрахунок найкращих інтервалів профілактичного обслуговування на основі даних про деградацію компонентів.

Оптимізація за економічними показниками. Економічна оптимізація орієнтована на мінімізацію витрат, пов'язаних з виробництвом, передачею та розподілом електроенергії. Вона відіграє ключову роль у забезпеченні сталого розвитку ЛЕС та ефективного використання енергетичних ресурсів. Основні напрями передбачають: а) мінімізацію операційних витрат: урахування витрат на паливо, технічне обслуговування, амортизацію обладнання; б) оптимізацію структурних інвестицій: вибір ефективних варіантів розвитку інфраструктури з урахуванням прогнозованих навантажень; в) мінімізацію втрат енергії в ЛЕС: забезпечення раціонального розподілу енергії та зменшення трансформаційних втрат; г) оптимальне ціноутворення: розробка моделей тарифікації, що враховують сезонні коливання попиту та витрати на виробництво.

Оптимізація за екологічними параметрами. Екологічна оптимізація спрямована на зменшення негативного впливу ЛЕС на довкілля. Основні напрями включають: а) мінімізацію викидів парникових газів та забруднювальних речовин: розрахунок оптимальних режимів експлуатації РГ для зниження рівня забруднення; б) максимізацію використання ВДЕ: розробка стратегій інтеграції мінливої генерації з ВДЕ у систему із забезпеченням стабільності електропостачання; в) оптимізацію використання ресурсів: управління витратами на виробництво електроенергії з урахуванням екологічних стандартів; г) запровадження циркулярної економіки: рециклінг матеріалів та оптимізація утилізації побічних продуктів енергетичних процесів.

ПОСИЛАННЯ

1. Каплун В. В. Формування енергетичних структур енергонезалежних громад: монографія. НУБІП; Інститут загальної енергетики НАН України. Одеса: видавничий дім «Гельветика», 2024. 312 с.
2. Денисюк С. П., Стшелецькі Р. Формування складових інтелектуальної платформи керування енергетичними системами та мережами. *Енергетика: економіка, технології, екологія.* 2019. № 3. С. 8–22. doi: 10.20535/1813-5420.3.2019.196368.
3. Бєлоха Г. С. Оптимізація техніко-економічних показників локальних систем електроживлення з транзактивним керуванням: монографія. Київ: НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2023. 127 с.
4. Лежнюк П. Д., Рубаненко О. Є., Гунько І. О. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлювальними джерелами електроенергії: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2018. 171 с.

УДК 621.311

ОЦІНКА РЕЖИМНОЇ НАДІЙНОСТІ ПІД ЧАС КАСКАДНИХ АВАРІЙ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ З ВЕЛИКОЮ ЧАСТКОЮ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

Є. І. Бардик[1], О. Л. Бондаренко[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
тел.: (097) 321-18-04, e-mail: bonduro@gmail.com

У роботі запропоновано комплексний імовірнісно-статистичний підхід і алгоритм для дослідження режимної надійності електроенергетичних систем з високою часткою відновлюваних джерел енергії під час відмов електрообладнання і каскадного розвитку відмов, який ґрунтується на використанні ризику як показника надійності, що дає можливість оцінювати ризик розвитку каскадної аварії та рівень важкості кінцевих станів системи.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, ризик, надійність електропостачання, режими роботи, каскадна аварія.*

ASSESSMENT OF REGIME RELIABILITY IN CASE OF CASCADE FAILURES IN ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH A LARGE SHARE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

Ye. Bardyk[1], O. Bondarenko[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (097) 321-18-04, e-mail: bonduro@gmail.com

The paper proposes a comprehensive probabilistic-statistical approach and algorithm for studying the regime reliability of power systems with a high share of renewable energy sources in the presence of equipment failures and cascading failures. This approach is based on the use of risk as a reliability indicator, allowing for the assessment of the risk of cascading failure development and the severity of the system's final states.

Key words: *renewable energy sources, risk, power supply reliability, operating modes, cascade failure.*

ORCID: [1]0000-0002-5776-1500; [2]0000-0001-9444-8428.

Сучасні електроенергетичні системи (ЕЕС) включають велику кількість різнотипного електрообладнання (ЕО) з різними технічними характеристиками, режимами роботи та термінами експлуатації. При цьому частина одиниць ЕО може мати дефекти зі значним розвитком або великий загальний спрацьований ресурс працездатності. Це призводить до того, що існує висока ймовірність їх відмови та, залежно від схемно-режимних умов функціонування, до різних збитків внаслідок відмов ЕО. Аварійні ситуації, викликані відмовами ЕО, можуть призводити до порушення динамічної стійкості енергосистеми та окремих вузлів навантаження ЕЕС за напругою, каскадного розвитку аварій і, як наслідок, до порушення технологічних процесів підприємств-споживачів та АЕС, що супроводжується значними збитками. Також інтеграція відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в ЕЕС призвела до зростання залежності від мінливого характеру відновлюваної генерації [1, 2].

Робота джерел ВДЕ у складі ЕЕС характеризується ймовірнісним та дискретним характером генерації електроенергії. Протягом доби спостерігаються часті та швидкі коливання обсягу генерованої потужності в певному діапазоні. Особливо ця проблема стає помітною за несприятливих погодних умов. Інтеграція значних обсягів об’єктів ВДЕ в ЕЕС вимагає додаткових резервних потужностей для компенсації змін у структурі генерувальних потужностей. Невизначеність у генерації електроенергії з ВДЕ може призвести до неоптимального складу генерувальних одиниць. У разі раптових змін робочої потужності ВДЕ електростанції, що працюють, повинні мати достатній резерв для оперативного реагування на такі зміни. Навіть за високої точності прогнозування потужності об’єктів ВДЕ їхній вплив на ЕЕС може бути суттєвим [1].

Розрізняють статичну та динамічну режимну надійність [2, 3]. Оцінка статичної режимної надійності не враховує динамічні перехідні процеси, а модель ЕЕС обмежується рівняннями сталих режимів. Один із підходів до її оцінки базується на розрахунку послідовності сталих режимів при моделюванні каскадного розвитку відмов. Алгоритм такого підходу включає такі етапи:

1. У вихідному усталеному режимі відбувається відмова одного з елементів. Якщо це не спричиняє порушення статичної стійкості ЕЕС, перевантаження інших елементів або неприпустимого зниження напруги, то така первинна відмова не викликає каскадного відключення інших елементів.

2. Якщо ж первинна відмова призводить до порушення статичної стійкості ЕЕС, перевантаження елементів, що залишилися в роботі, або значного зниження напруги в системі, запускається каскадний процес. Відключаються перевантажені лінії електропередачі та вузли з неприпустимо низькою напругою, а також відбувається відключення частини навантажень і генерувальних потужностей.

3. Після відключення цих елементів проводиться повторний розрахунок усталеного режиму з оцінкою статичної або термічної стійкості. Якщо стійкість знову порушується, відключаються нові перевантажені елементи, що тягне за собою подальшу втрату частини навантажень і генерації подібно попередньому.

4. Процес триває, доки система не розпадеться на ізольовані частини або елементи, що залишилися в роботі, не працюватимуть в допустимому режимі.

У загальному випадку при каскадному розвитку первинної відмови враховуються ймовірності відмов захисних пристроїв [2]. Імовірності станів системи внаслідок каскадних відмов, за умови незалежності відповідних випадкових подій, визначаються за формулою [2, 3]:

$$p_l\left(D_l\right)=\sum_{i,\,j}\prod_{i}q_i\prod_{j\neq i}p_j\ ,\quad l=\overline{1,L}\ , \tag{1}$$

де $p_l(D_l)$ – імовірність дефіциту потужності величиною D_l у розглянутому стані l системи; q_i – імовірність відмови елемента або захисту; p_j – імовірність безвідмовної роботи елемента або захисту; i, j – номери елементів ЕЕС.

Як інтегральний показник функціонування об’єктів енергетики часто використовується показник ризику [1, 3]. Для оцінки режимної надійності підсистеми ЕЕС він визначається за формулою [2]:

$$R_k=\sum_{l=1}^{L}p_l\left(D_l\right)\cdot\left(D_l\right),\quad k=\overline{1,K}\ , \tag{2}$$

де K – кількість первинних відмов.

У роботах [2, 4] представлена модифікація оцінки ризику, яка враховує питомий збиток через раптовий дефіцит потужності для конкретних споживачів:

$$R_{ky}=\sum_{l=1}^{L}p_l\left(D_l\right)\cdot\sum_{i=1}^{n}D_i\cdot y_{\text{вні}}\ ,\quad k=\overline{1,K}\ , \tag{3}$$

де n – число вузлів схеми ЕЕС, решта позначень відповідають (1) і (2).

Ключовим аспектом оцінки режимної надійності є розрахунок потокорозподілу для визначення наслідків відмов елементів системи, включно з каскадними відмовами. Розрахунок виконується з метою контролю допустимих рівнів напруг у вузлах і струмів у зв’язках. Якщо параметри виходять за допустимі межі, моделюється дія захистів, які відключають перевантажені повітряні лінії або фідери при критично низькому рівні напруги.

Розвиток відмов моделюється з урахуванням послідовності ймовірних подій. При моделюванні каскадного розвитку відмов внаслідок дії захистів від неприпустимого рівня напруг у вузлах разом з фідерами відключається навантаження. Насамперед доцільно відключати невідповідальних споживачів, для чого мають бути передбачені необхідні схемні рішення для живлення різних за вимогами надійності електроприймачів.

ПОСИЛАННЯ

5. Бардик Є. І., Бондаренко О. Л., Болотний М. П. Аналіз режимної надійності при плануванні сталого розвитку енергосистеми. Відновлювана енергетика. 2024. № 4(79). С. 46–58.
6. Бардик Є. І., Бондаренко О. Л. Оцінка режимної надійності електроенергетичної системи на основі визначення індексу ризику при відмовах вузлів навантаження з відповідальними споживачами. Технічні науки та технології: науковий журнал. 2019. № 2(16). С. 105–117.
7. A probabilistic risk-based security assessment tool allowing contingency forecasting / E. Ciapessoni et al. 2018 IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), Boise, ID, 24–28 June 2018. 2018.
8. Goerdin S. A. V., Smit J. J., Mehairjan R. P. Y. Monte Carlo simulation applied to support risk-based decision making in electricity distribution networks. 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, Eindhoven, Netherlands, 29 June – 2 July 2015. 2015.

УДК 621.311

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВАКУУМНИХ ВИМИКАЧІВ ПІДСИСТЕМ ЕЕС З ОБ'ЄКТАМИ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Є. І. Бардик[1], О. Л. Бондаренко[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
тел.: (097) 321-18-04, e-mail: bonduro@gmail.com

У роботі запропонована комплексна лінгвістична математична модель визначення ресурсу працездатності та ймовірності відмови функціональних вузлів і вакуумного вимикача в цілому, яка ґрунтується на використанні визначальних контрольованих параметрів, отриманих в режимах Online та Offline моніторингу об'єкта. Розроблена математична модель може бути використана як складова комплексу програм аналізу ризиків та формування превентивних дій щодо забезпечення експлуатаційної надійності підсистем ЕЕС з об'єктами відновлюваної енергетики.

Ключові слова: *технічний стан, вимикач, нечітка логіка, об'єктки відновлюваної енергетики.*

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF VACUUM CIRCUIT BREAKERS IN EPS SUBSYSTEMS WITH RENEWABLE ENERGY FACILITIES

Ye. Bardyk[1], O. Bondarenko[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (097) 321-18-04, e-mail: bonduro@gmail.com

The paper proposes a comprehensive linguistic mathematical model for determining the service life and failure probability of functional units and the vacuum circuit breaker as a whole. The model is based on the use of key controlled parameters obtained in Online and Offline monitoring modes of the object. The developed mathematical model can be used as a component of a software suite for risk analysis and the formation of preventive actions to ensure the operational reliability of EPS subsystems with renewable energy facilities.

Key words: *technical condition, circuit breaker, fuzzy logic, renewable energy facilities.*

ORCID: [1]0000-0002-5776-1500; [2]0000-0001-9444-8428.

На сьогодні ринок електрообладнання пропонує широкий спектр комутаційних апаратів. В електричних мережах середньої напруги застосовуються вимикачі таких типів: малооливні, вакуумні та елегазові. Причому у світі чітко видно тенденцію збільшення частки вакуумних вимикачів у мережах середньої напруги підсистем ЕЕС з об'єктами відновлюваної енергетики. Активне застосування вакуумних вимикачів в електричних мережах середньої напруги, пов'язано з властивими їм перевагами в порівнянні з іншими типами вимикачів. Станом на 2010 рік вакуумні вимикачі становили майже 80 % загальної кількості вимикачів середньої напруги у світі [1]. У Європі та США частка вакуумних вимикачів у загальній кількості випущених апаратів становить 70 %, а в Японії – 100 % [1, 2].

Дослідження показують, що статистичні дані щодо відмов, дефектів та несправностей вимикачів середньої напруги, які можна було б використовувати для проведення належного аналізу надійності вимикачів, є недосконалими, неповними та застарілими [3]. У вакуумних вимикачах можуть з'явитися дефекти протягом терміну експлуатації, які надалі можуть призвести до аварій і стати причиною відключення електроенергії [1, 2].

У табл. 1 наведена структура відмов комірок малооливних і вакуумних вимикачів 6–10 кВ за період 2016–2018 років [4]. Було зафіксовано лише два випадки втрати герметичності дугогасної камери вакуумного вимикача. Серед відмов малооливних вимикачів на частку їх приводу припало трохи більше 20 % відмов. Для комірок із вакуумними вимикачами основною причиною відмов є несправності ланцюгів управління, а для малооливних – пробій ізоляції [4]. Частота відмов і середній час відновлення у комірок вакуумних вимикачів приблизно вдвічі менше, ніж у малооливних. Це пов'язано з тим, що кількість компонентів і рухомих частин у вакуумного вимикача у два рази менше, ніж у малооливного [4]. IEEE проводила загальнонаціональні дослідження та збір даних, щоб отримати дані про надійність обладнання та види відмов. Звіт опублікований як стандарт IEEE Std. 493-2007 [3]. Останні показники надійності вакуумних вимикачів, які опубліковані в стандарті IEEE Std. 493-2007 показують, що частота відмов на рік становить 3,3 %.

Таблиця 1. Структура відмов комірок вимикачів середньої напруги

Причина відмови	Відмови конструктивних елементів комірок вимикачів, шт./%	
	малооливних	вакуумних
Дугогасна камера	10 / 13,3	2 / 8,3
Привід	17 / 22,7	0 / 0
Ланцюги керування	19 / 25,4	13 / 52,0
Опорна ізоляція та вводи	25 / 33,3	9 / 36,0
Збірні шини	4 / 5,3	1 / 4,0
Всього	75 / 100	25 / 100

Тому важливою задачею є розробка комплексної математичної моделі визначення спрацьованого ресурсу та ймовірності відмови вакуумних вимикачів. Складність виявлення аналітичних залежностей і класу технічного стану об'єкта потребує для побудови відповідних моделей вимикача використання теорії нечітких множин і нечіткої логіки, що дозволяє подати в єдиній формі різнорідну інформацію про об'єкт [5, 6].

Як вхідні змінні, які отримані в режимах Online та Offline моніторингу лінгвістичної моделі вакуумного вимикача, використано такі: часові характеристики (X_1): власний час вмикання (X_{11}), власний час вимкнення (X_{12}), різночасність замикання контактів (X_{13}), різночасність розмикання контактів (X_{14}); швидкісні характеристики (X_2): швидкість руху контактів під час замикання (X_{21}), швидкість руху контактів при розмиканні (X_{22}); струмові характеристики (X_3): струм котушки вмикання (X_{31}), струм котушки вимикання (X_{32}); електричні характеристики (X_4): опір постійному струму струмопровідного контуру контактної системи (X_{41}), довжина електричного розриву (X_{42}), довжина ходу рухомого контакту (X_{43}), сума квадратів усіх відключених струмів КЗ (X_{44}). Як вихідна змінна використовується: клас технічного стану, ресурс працездатності, ймовірність відмови вимикача.

Комплексна лінгвістична математична модель вакуумного вимикача побудована на принципі дворівневої ієрархічної структури. На першому рівні розташовані чотири експертні системи часткових висновків щодо технічного стану окремих функціональних вузлів (X_1, X_2, X_3, X_4) зі своїми базами знань та функціями належності термів вхідних лінгвістичних змінних, побудованих з урахуванням особливостей даного типу вимикачів та на основі обробки даних про історію експлуатації. Визначення ресурсу працездатності та ймовірність відмови високовольтного вимикача в цілому виконується на першому рівні ієрархічної структури шляхом агрегування часткових висновків з урахуванням вагових коефіцієнтів, які визначаються на основі експертної інформації, яка акумулює досвід компетентних фахівців у галузі експлуатації комутаційного обладнання.

Розроблена математична модель вакуумного вимикача дозволяє, на основі декомпозиції об'єкта на окремі функціональні вузли та побудованих лінгвістичних математичних моделей оцінки їх технічного стану, виконати агреговану оцінку технічного стану всього вимикача визначивши при цьому ресурс працездатності та ймовірність відмови за інформацією, отриманою в режимах Online та Offline моніторингу об'єкта, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо стратегії експлуатації парку вакуумних вимикачів на основі їх технічного стану.

Проведене тестування розробленої лінгвістичної моделі вакуумного вимикача підтвердило її адекватність. Основними перевагами цієї моделі в порівнянні з аналогами є: визначення спрацьованого ресурсу на основі реальних експлуатаційних даних, урахування впливу окремих функціональних вузлів на загальний ресурс через відповідні вагові коефіцієнти, можливість адаптації лінгвістичної моделі до конкретних умов експлуатації.

ПОСИЛАННЯ

1. Slade P. G. Vacuum Interrupter: Theory, Design, and Application. Taylor & Francis Group, 2020. 608 p.
2. Switching in Electrical Transmission and Distribution Systems / R. Smeets et al. Wiley, 2014.
3. Institute Of Electrical and Electronics Engineers. IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems. New York : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007. 215 p.
4. Mayorov A. V., Lvov M. Y., Chelaznov A. A. Analysis of the Reliability of Circuitries for A 20 kV Electrical Network. Power Technology and Engineering. 2023.
5. Бардик Є. І., Бондаренко О. Л. Нечітке моделювання комутаційного обладнання для задач оцінки ризику виникнення аварійних ситуацій в енергосистемі при відмовах електрообладнання. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4. С. 75–86.
6. Костерєв М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 131 с.

УДК 621.311

ВИЗНАЧЕННЯ ПОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІД НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ СПОЖИВАЧІВ

І. О. Гунько[1], В. М. Лисий[2], О. А. Ковальчук[3]

[1,2]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, 02094, м. Київ, Україна
[3]ТОВ «Енергоінвест»,
провулок Станіславського, 16, м. Вінниця, 21022, Україна
тел.: (097) 938-36-78, e-mail: iryna_hunko@ukr.net

Дослідження присвячене актуальній задачі визначення походження електроенергії, отриманої кінцевим споживачем, в умовах децентралізації генерування та взятого світовою спільнотою курсу на декарбонізацію. Пропонується алгоритм, який дозволяє відстежувати «шлях» електроенергії від виробника до споживача. Результати дослідження можуть бути використані для підвищення ефективності функціонування локальних електроенергетичних систем.

Ключові слова: *декарбонізація, децентралізація, низьковуглецеві джерела енергії, походження електроенергії.*

DETERMINING THE ORIGIN OF ELECTRICITY FROM LOW-CARBON ENERGY SOURCES FOR CONSUMERS

I. Hunko[1], V. Lysyi[2], O. Kovalchuk[3]

[1,2]The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrologichna St., 02094, Kyiv, Ukraine
[3]Energoinvest LLC,
16 Stanislavskoho Lane, Vinnytsia, 21022, Ukraine
phone: (097) 938-36-78, e-mail: iryna_hunko@ukr.net

The research is devoted to the actual task of determining the origin of electricity received by the end consumer in the context of decentralisation of generation and the global community's course towards decarbonisation. An algorithm is proposed that allows tracking the 'path' of electricity from producer to consumer. The results of the study can be used to improve the efficiency of local electricity systems.

Key words: *decarbonisation, decentralisation, low-carbon energy sources, electricity origin.*

ORCID: [1]0000-0003-2868-4056; [2]0009-0007-0211-9100

Постановка задачі

Сучасний енергетичний сектор зазнає суттєвих змін у зв'язку з необхідністю зменшення викидів парникових газів і переходом до екологічно чистих технологій. Декарбонізація та розвиток низьковуглецневих джерел енергії (НВДЕ), до яких належать як відновлювані джерела енергії (ВДЕ), так і атомна енергетика (малі модульні реактори), є ключовими напрямами енергетичної політики багатьох країн [1]. Збільшення частки НВДЕ у загальному енергобалансі сприяє зниженню залежності від викопного палива та покращенню екологічної ситуації. Водночас інтеграція НВДЕ в електромережу створює нові виклики, зокрема щодо стабільності енергопостачання та управління потоками потужності. Актуальною постає задача підтвердження походження електроенергії, отримуваної кінцевими споживачами. Представники екологічно відповідального бізнесу прагнуть отримувати електроенергію саме з низьковуглецевих джерел, що стимулює розвиток гарантій походження (GO) та контрактів на купівлю електроенергії (PPA).

Однак визначення частки енергії від НВДЕ в енергоміксі є складним завданням через використання електричних мереж загального призначення. Для цього необхідно використовувати точні методи аналізу та розрахунку перетікань електроенергії між вузлами системи. Ефективне відстеження потоків потужності дозволяє не лише підтвердити походження електроенергії, а й сприяти оптимальному використанню наявних ресурсів. Сучасні підходи до розподілу потоків електроенергії включають математичне моделювання, алгоритми оптимізації та комп'ютерне моделювання. Враховуючи складність конфігурації електроенергетичних систем, необхідно використовувати точні та ефективні методи аналізу режимів роботи мереж.

У досліджені представлено математичну модель та алгоритм для оцінки частки електроенергії, що постачається від низьковуглецевих джерел. Алгоритм показаний на рис. 1. Метод базується на аналізі перетікань потужності в мережі з урахуванням коефіцієнтів розподілу перетоків потужності від НВДЕ по вітках схеми [2]. Виконано розрахунки для тестової 14-вузлової схеми IEEE, в 6 та 8 вузлах якої встановлено фотоелектричні станції по 15 МВт. Контрольний

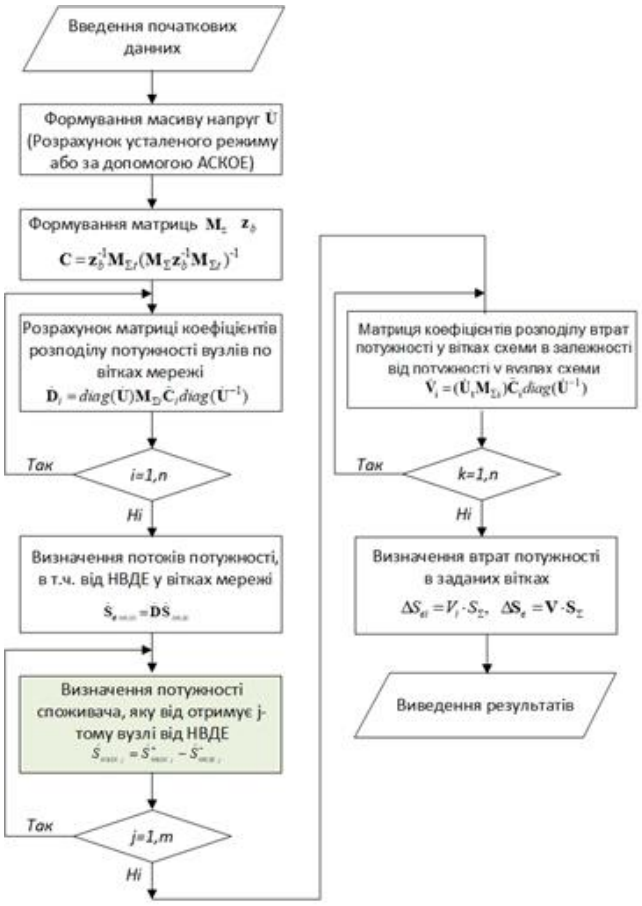


Рис. 1. Алгоритм визначення електроенергії споживача, що походить від низьковуглецевих джерел енергії

розрахунок усталеного режиму для максимального генерування ФЕС був виконаний за допомогою програми PowerFactory 15.1. За результатами розрахунку визначені напруги у вузлах. Вважаємо, що перший вузол отримує живлення від НВДЕ, в нашому випадку від АЕС, а другий вузол отримує живлення від джерела з високим вуглецевим слідом. Виконаємо розрахунки перетоків потужності по вітках схеми з урахуванням їх походження, для розглянутої схеми мережі відповідно до алгоритму. Матриця розподілу потужностей по вітках електричної мережі, зокрема й від НВДЕ матиме такий вигляд:

$$S = \begin{pmatrix} & 2 & 3 & 4 & \dots & 12 & 13 & 14 \\ 1 & -15{,}05 & 72{,}35 & 31{,}55 & \dots & 3{,}4 & 7{,}62 & 8{,}85 \\ 2 & 0{,}54 & 54{,}95 & 7{,}07 & \dots & 0{,}61 & 1{,}39 & 1{,}8 \\ 3 & 1{,}11 & 10{,}23 & 14{,}33 & \dots & 1{,}23 & 2{,}81 & 3{,}65 \\ 4 & 1{,}49 & 4{,}12 & 8{,}97 & \dots & 1{,}45 & 3{,}15 & 3{,}07 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 17 & -0{,}01 & 0{,}22 & 0{,}2 & \dots & 3{,}8 & 2{,}05 & 1{,}08 \\ 18 & -0{,}06 & 0{,}95 & 0{,}86 & \dots & 1{,}16 & 8{,}91 & 4{,}7 \\ 19 & -0{,}07 & 1{,}15 & 1{,}04 & \dots & -0{,}67 & -2{,}51 & 5{,}69 \\ 20 & -0{,}01 & 0{,}22 & 0{,}2 & \dots & -2{,}29 & 2{,}04 & 1{,}08 \end{pmatrix}$$

Значення елементів у стовпцях матриці показують розподіл потужності по вітках схеми від НВДЕ, що дає можливість розрахунковим шляхом визначити, яка частка «чистої» електроенергії була спожита конкретним споживачем. Так, на прикладі споживання навантаження у вузлі 9, можна визначити, що від ФЕС було отримано 5,64 МВт (з них від ФЕС 1 – 0,66 МВт, від ФЕС 2 – 4,98 МВт), від другого вузла з ТЕС перетік до вузла 9 становить 0,19 МВт, решту отримує від АЕС. Для порівняння розглянемо покриття навантаження у вузлі 5. Відповідно до розрахунків у вузол 5 перетік від ТЕС становить 2,97 МВт, решта покривається з балансувального вузла. Виходячи з того, що у вузлі 9 споживається 29,5 МВт, а у вузлі 5 – 7,6 МВт, то у відсотковому співвідношенні потужності, отриманої від НДЕ, до загальної потужності навантаження отримаємо такі результати: для вузла 5– 40 %, для вузла 9 – 99 %, 20 % з яких – від ФЕС. Знаючи матрицю розподілу потужностей по вітках електричної мережі, можна також визначити матрицю втрат потужності, включно з втратами від перетікання НВДЕ. Загальні втрати активної потужності, розраховані матричним методом, становлять 12,3 МВт. За результатами розрахунку усталеного режиму з використанням комплексу PowerFactory, ці втрати становлять 12,37 МВт, що підтверджує точність запропонованого методу.

Висновки. Результати розрахунків та компютерного моделювання підтвердили можливість точного визначення частки електроенергії, отриманої з НВДЕ, у кінцевого споживача. Запропонований підхід дозволяє підвищити прозорість ринку електроенергії та створити умови для ефективного розвитку низьковуглецевої енергетики. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення механізмів гарантій походження, а також для розробки стратегій сталого розвитку.

ПОСИЛАННЯ

1. Vormedal I., Bjander J., Lie Larsen M., Byskov Lindberg M. (2023). Technological Change and the Politics of Decarbonization. A Re-making of Vested Interests, Environmental Innovation and Societal Transitions, Volume 47, 100725, ISSN 2210-4224. doi.10.1016/j.eist.2023.100725.
2. Hunko I., Kudrya S., Komar V., Lezhniuk P. Mathematical Model and Algorithm for the Determination of the Origin of Electricity From Renewable Energy Sources in the Electric Power System. Відновлювана енергетика. 2024. № 2. Pp. 6–12. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)6-12

УДК 621.313.84

ДОСВІД ЕКСПЛУАТАЦІЇ АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ЕНЕРГОГЕНЕРУВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

М. А. Коваленко[1], І. Я. Коваленко[2], Є. О. Тітов[3], О. О. Базаров[4]

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,
03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37,
Тел./факс +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko_ma@i.ua

Проведено аналіз статистичних даних щодо відмов автономних електромеханічних перетворювачів малої та середньої потужності. Виявлено найпоширеніші електричні та механічні несправності, а також надано рекомендації для підвищення надійності та довговічності генераторів. Особливу увагу приділено експлуатації зазначених пристроїв у воєнних умовах, де спостерігається зміщення балансу поломок у бік механічних несправностей. Результати дослідження можуть бути використані для розробки ефективних профілактичних заходів, удосконалення інструкцій з технічного обслуговування та оптимізації режимів експлуатації генераторів.

Ключові слова: *Автономні електромеханічні перетворювачі, електрогенерувальні пристрої, експлуатація, енергоефективність, надійність, технічне обслуговування, електропостачання, генераторні системи.*

EXPERIENCE IN OPERATING AUTONOMOUS ELECTROMECHANICAL ENERGY GENERATING DEVICES

M. Kovalenko[1], I. Kovalenko[2], Y. Titov[3], O. Bazarov[4]

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056
Tel./fax +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

The article analyzes statistical data on failures of autonomous electromechanical converters of low and medium power. The most common electrical and mechanical failures are identified, and recommendations for improving the reliability and durability of generators are given. Particular attention is paid to the peculiarities of operation of these devices in military conditions, where there is a shift in the balance of breakdowns towards mechanical failures. The results of the study can be used to develop effective preventive measures, improve maintenance instructions, and optimize generator operation modes.

Keywords: *Autonomous electromechanical converters, power generating devices, operation, energy efficiency, reliability, maintenance, power supply, generator systems.*

ORCID: [1]0000-0002-5602-2001; [2]0000-0003-1097-2041; [3]0009-0007-8222-7477, [4]0009-0008-8491-2678

Автономні електромеханічні перетворювачі малої та середньої потужності відіграють важливу роль у забезпеченні енергетичної стійкості України, особливо в умовах воєнного стану та постійних атак на енергетичну інфраструктуру [1]. Вони стали життєво необхідними для підтримки роботи критично важливих об’єктів, як-от лікарні, школи, насосні станції водопостачання та зв’язок [2]. Дизель-генераторні установки (ДГУ) та бензогенератори забезпечують безперебійне електропостачання, дозволяючи продовжувати функціонування ключових установ та задовольняти базові потреби населення, такі як освітлення та опалення [3]. У воєнних умовах ці установки стали незамінними для забезпечення енергією військових об’єктів, зв’язку та координації дій [4].

Аналіз статистики відмов показав, що 51 % воєнних умовах цей баланс зміщується: механічні відмови становлять 75–85 %, а електричні – 15–25 %. Це пояснюється складними умовами експлуатації, такими як пил, волога, високі та низькі температури, а також часті пуски та зупинки, які призводять до прискореного зносу механічних компонентів. Серед електричних несправностей найпоширенішими є пошкодження обмоток статора через асиметрію навантаження, вихід з ладу регуляторів напруги, несправності акумуляторної системи та порушення ізоляції електропроводки. Асиметричне навантаження є однією з головних причин критичних відмов, оскільки перевантаження окремих фаз викликає локальний перегрів та руйнування ізоляції.

Рис. 1. *Розподілення відмов на електричні та механічні*

Механічні несправності найчастіше пов'язані зі зносом поршневої групи, недостатнім змащуванням, перегрівом двигуна через несправності системи охолодження та проблемами з паливною системою. Важливим фактором, що впливає на знос механічних компонентів, є якість пального та регулярність технічного обслуговування. Наприклад, використання низькоякісного пального або мастильних матеріалів прискорює знос паливної системи та двигуна. У воєнних умовах недостатнє технічне обслуговування через відсутність запчастин або кваліфікованого персоналу також значно збільшує ризик виходу обладнання з ладу.

Для покращення експлуатації автономних перетворювачів рекомендовано впровадження систем моніторингу стану генераторів, які дозволять виявляти несправності на ранніх етапах. Регулярна діагностика та контроль навантаження допоможуть запобігти критичним поломкам. Розробка алгоритмів автоматичного розподілу навантаження між фазами дозволить уникнути асиметрії, яка є однією з головних причин електричних несправностей. Також важливим є удосконалення систем захисту та підвищення надійності ізоляційних матеріалів. Прикладами несправностей, які були проаналізовані, є руйнування шестерні приводу помпи охолодження внаслідок заклинювання підшипника та перегрів обмоток статора через асиметрію навантаження. Руйнування шестерні призводить до зупинки помпи охолодження, що може спричинити перегрів двигуна та серйозні пошкодження. Для запобігання подібним ситуаціям рекомендовано регулярне технічне обслуговування, своєчасну заміну зношених деталей та використання якісних запасних частин. У разі електричних несправностей, таких як перегрів обмоток статора, важливо контролювати баланс навантаження між фазами та використовувати пристрої захисту, як-от реле асиметрії напруги або струму.

Отримані результати підкреслюють необхідність комплексного підходу до технічного обслуговування та діагностики автономних електромеханічних перетворювачів. Регулярне обслуговування, використання якісних компонентів та контроль умов експлуатації допоможуть збільшити термін служби обладнання. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на розробку ефективніших систем захисту, оптимізацію режимів експлуатації та вдосконалення конструкції перетворювачів для роботи в екстремальних умовах. Умови війни в Україні підкреслили важливість автономних енергетичних систем, які стали не лише джерелом резервного електропостачання, але й ключовим елементом забезпечення стійкості та виживання країни.

ПОСИЛАННЯ

1. V. M.Golovko Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator / V. M. Golovko, M. Ya. Ostroverkhov, M. A. Kovalenko, I. Ya. Kovalenko, D. V. Tsyplenkov. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022, (5): 074–079. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074.
2. Chumack V. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation / V. Chumack V. Bazenov, O. Tymoshchuk, M. Kovalenko, S. Tsyvinskyi, I. Kovalenko., I. Tkachuk. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62. (ISSN 1729-3774).
3. Ostroverkhov, M. Development of the control system for taking off the maximum power of an autonomous wind plant with a synchronous magnetoelectric generator / M. Ostroverkhov, V. Chumack, M. Kovalenko, I. Kovalenko. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(2(118), 67–78. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263432.
4. "IEEE standard definitions for the measurement of electric power quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced, or unbalanced conditions," IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000), pp. 1–50, 2010.

УДК 62-643

КАВІТАЦІЙНІ ЕЛЕКТРИЧНІ ТЕПЛОГЕНЕРАТОРИ

Д. Ю. Череватський

Інститут економіки промисловості НАН України,
вул. Марії Капніст, 2, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (044) 200 5571, e-mail: cherevatskyi@nas.gov.ua

Альтернативою системам опалення на викопному паливі можуть виявитися електричні водяні кавітаційні генератори теплової енергії: двигун, насос, кавітатор, акумулятор теплової енергії. Інновація, запатентована в Україні та інших країнах, отримала промислове впровадження в реальних умовах експлуатації.

Ключові слова: *вода, електрика, насос, кавітатор, система опалення.*

CAVITATIONAL ELECTRIC HEAT GENERATORS

D. Cherevatskyi

Institute of Industrial Economics Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
2 Maria Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (044) 200 5571, e-mail: cherevatskyi@nas.gov.ua

An alternative to fossil fuel heating systems may be electric water cavitation generators of thermal energy: engine, pump, cavitator, thermal energy accumulator. The innovation, patented in Ukraine and other countries, has been industrially implemented in real operating conditions.

Keywords: *water, electricity, pump, cavitator, heating system.*

ORCID: 0000-0003-4038-6393.

У 2019 р. більшість з 18,9 млн існуючих у Німеччині житлових будинків використовували для опалення природний газ (45,9 %) та солярку (29,8 %)[1], але в багатьох європейських країнах вступає в дію заборона систем опалення на викопному паливі[2].

Альтернативою традиційному опаленню вважають теплові насоси, проте є маловідома науковцям інноваційна технологія на ефекті кавітаційного нагріву рідини[3]. У 2004 р. в місті Моспіно Донецької області з установками гідродинамічного нагріву води "Термер-400" (16 од.) було побудовано велику міську котельню, яка довгий час знаходилася в експлуатації[4]. Сумарна опалювальна площа становила близько 47,5 тис. м^2, установлена електрична потужність – 4,8 МВт, ККД теплових агрегатів – 94 %, обслуговуючий персонал – 10 осіб. Досвід використання перетворювачів електричної енергії на теплову продемонстрував можливість двократного скорочення річних витрат енергії на опалювання житлового і будівельного фонду – від 0,32 до 0,154 Гкал/м^2 на рік [3].

---

[1] So heizen die Deutschen Eine Studie des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) beleuchtet das Heizverhalten der Deutschen. Welche Energieträger werden genutzt? Welche Unterschiede gibt es zwischen den Bundesländern? URL: https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2019/10/Meldung/direkt-erfasst_infografik.html#:~:text=48%2C2%20Prozent%20der%2040,deutschen%20Wohnungen%20werden%20so%20beheizt (дата звернення: 04.07.2025).

[2] Європейські країни відмовляються від систем опалення на викопному паливі. URL: https://gree.com.ua/press-tsentr/mirovye-novosti/evropeyskye-stran-otkaz-vayutsya-ot-system-otoplenyya-na-yskopaemom-toplyve.html (дата звернення: 04.07.2025).

[3] Мартиненко С. А., Мартиненко В. С. (2010). Об'єднана енергосистема і спосіб експлуатації об’єднаної енергосистеми. Патент України на винахід № 89502. МПК: H02J 3/00, H02J 3/28. Бюл. № 3.

[4] Котко В. (2014). Електроенергія може успішно замістити природний газ при використання її для нагрівання теплоносія в нічні години у комплексі з акумуляцією тепла у системах централізованого обігріву приміщень у містах. URL: https://zn.ua/ukr/energy_market/chi-mozhna-zamistiti-gaz-elektrikoyu-_.html (дата звернення: 04.07.2025).

ПОСИЛАННЯ

1. So heizen die Deutschen Eine Studie des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW) beleuchtet das Heizverhalten der Deutschen. Welche Energieträger werden genutzt? Welche Unterschiede gibt es zwischen den Bundesländern? URL: https://www.bmwk-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2019/10/Meldung/direkt-erfasst_infografik.html#:~:text=48%2C2%20Prozent%20der%2040,deutschen%20Wohnungen%20werden%20so%20beheizt (дата звернення: 04.07.2025).
2. Європейські країни відмовляються від систем опалення на викопному паливі. URL: https://gree.com.ua/press-tsentr/mirovye-novosti/evropeyskye-stran-otkaz-vayutsya-ot-system-otoplenyya-na-yskopaemom-toplyve.html (дата звернення: 04.07.2025).
3. Мартиненко С. А., Мартиненко В. С. (2010). Об'єднана енергосистема і спосіб експлуатації об’єднаної енергосистеми. Патент України на винахід № 89502. МПК: H02J 3/00, H02J 3/28. Бюл. № 3.
4. Котко В. (2014). Електроенергія може успішно замістити природний газ при використання її для нагрівання теплоносія в нічні години у комплексі з акумуляцією тепла у системах централізованого обігріву приміщень у міс-тах. URL: https://zn.ua/ukr/energy_market/chi-mozhna-zamistiti-gaz-elektrikoyu-_.html (дата звернення: 04.07.2025).

УДК 621.311.25

ЦІЛІСНА ОЦІНКА СТІЙКОСТІ, ЕФЕКТИВНОСТІ ТА БЕЗПЕКИ СИСТЕМ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

Т. О. Евтухова[1], Д. С. Карпенко[2], О. В. Новосельцев[3], Є. В. Щербина[4]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (067) 607-16-84, e-mail: anovos773@ukr.net

Розглянутий у доповіді цілісний підхід обґрунтовує кількісні оцінки впливу відновлюваних джерел енергії на стійкість, ефективність і безпеку енергетичної системи, базуючись на результатах оптимізації мікромереж та їх взаємодії на децентралізованому P2P ринку.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, оптимізація, оцінка стійкості, ефективності та безпеки.*

A HOLISTIC ASSESSMENT OF THE SUSTAINABILITY, EFFICIENCY, AND SECURITY OF RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

T. Yevtukhova[1], D. Karpenko[2], O. Novoseltsev[3], Y. Shcherbyna[4]

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (067) 607-16-84, e-mail: anovos773@ukr.net

A holistic approach discussed in the report, based on the results of optimizing microgrids and their interaction in the decentralized P2P market, substantiates quantitative assessments of the impact of renewable energy sources on the sustainability, efficiency, and security of the energy system.

Key words: *renewable energy sources, optimization, assessment of sustainability, efficiency and security.*

ORCID: [1]0000-0003-4778-2479; [2]0000-0002-8022-9782; [3]0000-0001-9272-6789, [4]0000-0002-1565-4547

Renewable energy systems (RES) are defined as integrated energy supply and demand systems based on renewable energy as opposed to fossil fuels [1]. RES harnessing solar, wind, hydropower and biomass play a vital role in the transformation of modern energy systems [2-4]. Their impact should be holistically assessed in three key dimensions: sustainability, efficiency, and security. According to it, positive sustainability factors should include reducing greenhouse gas emissions, long-term resource availability and environmental conservation, and also take into account issues such as large-scale land and water use, and demand for rare earth materials. Positive efficiency factors should include advancements in technology, decentralization of energy production and sector coupling, and also take into account issues such as intermittency and variability, energy conversion and storage losses. Positive security factors should include diversification of energy mix, resilience against supply shocks and microgrid development, and also take into account issues such as grid stability issues, security risks and rare earth supply chain risks. A holistic assessment of RES aims to quantify the impact of renewable energy sources on sustainability, efficiency, and security when linked to smart grid optimization, off-grid microgrids, industrial energy systems, and decentralized peer-to-peer energy markets. Quantitative key indicators of sustainability impact are: carbon intensity reduction (gCO_2/kWh), renewable energy share (%), land use efficiency (MW/km²). Key indicators of efficiency are: energy conversion efficiency (%), capacity factor (%), transmission loss reduction (%). Key indicators of security impact are: energy supply resilience index, grid reliability index, security risk index.

We considered four smart grid optimization objective functions:

1) minimizing emissions while optimizing power generation;
2) optimizing renewable energy penetration in microgrids;
3) optimizing resilience by integrating demand response with backup energy storage; and
4) optimizing decentralized energy trading.

$$1)\ min \sum_t \left[C_{gen}(t) + \rho_{CO_2} \cdot E_{red}(t)\right],$$

where $C_{gen}(t)$ is the cost of generation at time t ($/kWh); ρ_{CO_2} is the carbon tax or social cost of carbon ($/gCO₂); $E_{red}(t)$ is carbon intensity reduction (gCO₂/kWh) – emission reduction due to RES.

$$2)\ min \sum_t \left[C_{op}(t) + E_{stor}(t) + E_{incen}(t)\right],$$

where $C_{op}(t)$ is operational cost of microgrid ($); $E_{stor}(t)$ is cost of battery storage deployment ($); $E_{incen}(t)$ is financial benefits from energy efficiency measures ($).

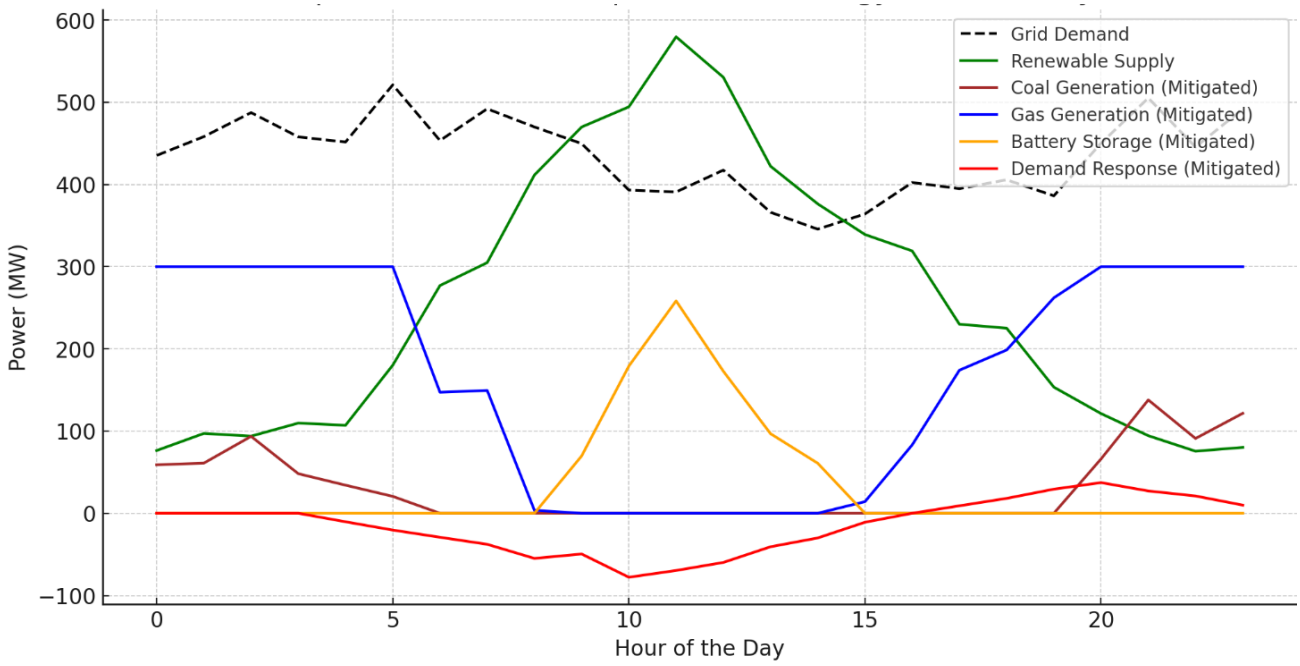
$$3)\ max \sum_t \left[C_{demand}(t) - C_{interruption}(t)\right],$$

where $C_{demand}(t)$ is revenue from demand-side flexibility ($); $C_{interruption}(t)$ is cost of production loss due to grid instability ($).

$$4)\ max \sum_{i=1}^{N} [U_i(E_i) - C_i(E_i)],$$

where $U_i(E_i)$ is utility function of participant *i*; $C_i(E_i)$ is cost function of participant *i*.

The results of optimizing the energy mix of the smart grid under the influence of emergency shutdowns are presented in figure below.



CONCLUSION

The transition to renewable energy is essential for achieving a sustainable, efficient, and secure energy system. However, to maximize benefits and mitigate risks, integration strategies such as energy storage development, smart grid technology, demand-side management, and diversified energy portfolios are crucial. are pivotal. The integration of renewable energy systems into existing grids not only reduces greenhouse gas emissions but also enhances energy independence and operational resilience. Their adoption significantly lowers carbon footprints, mitigating climate change impacts. However, achieving energy security through renewables requires addressing challenges such as the intermittency of sources like wind and solar, which can affect the reliability of energy supply. Diversification of energy portfolios with renewables reduces dependence on imported fuels, bolstering energy security.

REFERENCES

1. Yılmaz S., Selim H. (2013). A review on the methods for biomass to energy conversion systems design. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, 420-430, URL: https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.015.
2. Lv Y (2023), Transitioning to sustainable energy: opportunities, challenges, and the potential of blockchain technology. Frontiers in Energy Research, 11, 1258044. URL: https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1258044.
3. Liu P., Wang S., Wei Y. (2023). Administration strategy of energy management in smart grid: system view and optimization path. Frontiers in Energy Research, 11, 1202904, URL: https://doi.org/10.3389/fenrg.2023.1202904.
4. Foss M. (2022). The impact of renewables on energy security. Canadian Foreign Policy Journal, 28(3), 234–248. URL: https://doi.org/10.1080/11926422.2022.2118138.

УДК 621.472

СТАБІЛІЗАЦІЯ РОБОТИ ДВИГУНА СТІРЛІНГА ПРИ ЗМІННОМУ НАДХОДЖЕННІ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

В. М. Головко[1] , М. М. Бережнюк[2]

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
вул. Політехнічна, 37, навчальний корпус 20 м. Київ 03056, Київ, Україна[1,2]
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ[1],
e-mail: bermukola@gmail.com

Робота двигуна Стірлінга, який використовує концентроване сонячне випромінювання як основне джерело теплоти, ускладнюється через нестабільність сонячного випромінювання. Це негативно впливає на ефективність і стабільність роботи системи. У дослідженні розглянуто можливі способи компенсації цих коливань, зокрема використання біомаси, електричних нагрівачів та теплоакумулювальних ємностей. Такі підходи дозволяють підвищити стабільність і продуктивність системи, забезпечуючи безперервну генерацію енергії навіть за умов змінної інсоляції.

Ключові слова: *двигун Стірлінга, додаткове джерело енергії, сонячна енергетика*

STABILISATION OF THE STIRLING ENGINE OPERATION UNDER VARIABLE SOLAR RADIATION INPUT

V. Golovko[1], M. Berezhnyuk[2]

Faculty of Electric Power Engineering and Automatics,
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Politechnichna street, 37, Kyiv, Ukraine[1,2]
Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine, street Hnata Khotkevycha 20-a, Kyiv[1],
e-mail: bermukola@gmail.com

The operation of the Stirling engine, which uses concentrated solar radiation as the main source of heat, is complicated by the instability of solar radiation. This negatively affects the efficiency and stability of the system. The study examines possible ways to compensate for these variations, including the use of biomass, electric heaters, and heat storage tanks. Such approaches can increase the stability and performance of the system, ensuring continuous energy generation even under conditions of variable insolation.

Key words: *Stirling engine, additional energy source, solar energy*

ORCID: 0000-0002-0863-9269[1], 0000-0003-0195-96542[2]

Розвиток сонячної енергетики набуває дедалі більшої популярності завдяки значному потенціалу відновлюваних джерел енергії. Однією з проблем, що обмежує ефективність таких систем, є нерівномірність надходження сонячного випромінювання, що негативно впливає на стабільність роботи обладнання. Зокрема, двигун Стірлінга, який використовує теплоту від сконцентрованого сонячного випромінювання, демонструє високу ефективність, проте чутливий до змін рівня інсоляції.

Через коливання інтенсивності сонячного випромінювання виникає необхідність у додаткових джерелах теплоти для підтримки мінімального рівня температури. Дослідження [1, 2] показують, що інтеграція двигуна Стірлінга з джерелами теплоти, як-от пальники на деревних пелетах [1] чи біомасові системи [2], значно підвищує ефективність. Експериментальні результати свідчать, що використання біомаси може збільшити ККД до 72 % та забезпечити неперервну генерацію навіть за відсутності сонячного випромінювання. Крім того, застосування теплоакумулювальних ємностей [3] дає змогу зберігати енергію для подальшого використання в нічний час або в похмуру погоду.

Перспективним рішенням є також використання електричних нагрівачів, які допомагають компенсувати зниження температури в умовах недостатнього сонячного випромінювання у короткий проміжок часу, що дозволяє підвищити стабільність системи. Крім цього, інтеграція інтелектуальних систем управління дозволяє автоматично регу-

лювати подачу додаткової теплоти залежно від поточних умов, що сприяє підвищенню загальної ефективності системи. Такі підходи дають змогу забезпечити стабільну роботу двигуна Стірлінга без значних втрат енергії та необхідності у частих утручаннях оператора.

Загалом розгляд різних методів підтримки стабільної роботи двигуна Стірлінга дає змогу створювати надійніші та ефективніші енергетичні системи. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробці нових матеріалів для теплоакумуляторів та вдосконаленні алгоритмів управління для досягнення ще більшої ефективності.

Висновки. Нестабільність сонячного випромінювання є основною проблемою для ефективного використання двигуна Стірлінга. Інтеграція додаткових джерел теплоти, як-от біомаса або електричні нагрівачі, значно покращує стабільність і продуктивність системи. Використання теплоакумулювальних ємностей сприяє збереженню енергії та її подальшому використанню в умовах низької інсоляції. Автоматизовані системи управління забезпечують оптимальну роботу установки та знижують втрати енергії. Подальші дослідження можуть допомогти розробити ще ефективніші методи оптимізації роботи двигуна Стірлінга у відновлюваній енергетиці.

ПОСИЛАННЯ:

1. Cardozo E, Erlich C, Malmquist A, Alejo L. Integration of a wood pellet burner and a Stirling engine to produce residential heat and power. Appl Therm Eng. 2014; 73(1): 671-680. doi: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.08.024.
2. Thiers S, Aoun B, Peuportier B. Experimental characterization, modeling and simulation of a wood pellet micro-combined heat and power unit used as a heat source for a residential building. Energy Build. 2010; 42(6): 896-903. doi: https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.011.
3. Martin Nilsson. Simplified pumped thermal energy storage using a two-way Stirling cycle. Journal of Energy Storage. 2024; 73(2):108994. doi: https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108994.

УДК 004.9

FEATURES OF THE APPLICATION OF V-NETWORKS IN DIAGNOSTICS AND CONTROL OF DISCRETE SYSTEMS

V. Dubovyk[1], A. Bosak[2], B. Yavorskyi[3], P. Dushenok[4],

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Beresteyskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine,
phone: (044) 204-8225, e-mail: processor-w@ukr.net

The use of V-networks for evaluating simultaneous events taking into account time constraints is considered, which allows improving system diagnostics and energy efficiency, gaining a deeper understanding of the behavior of complex systems, identifying potential bottlenecks, and optimizing resource allocation.

Keywords: *scalable computing, V-networks, energy efficiency.*

ОСОБЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ V-МЕРЕЖ У ДІАГНОСТИЦІ ТА УПРАВЛІННІ ДИСКРЕТНИМИ СИСТЕМАМИ

В. Г. Дубовик[1], А. В. Босак[2], Б. Ю. Яворський[3], П. В. Душенок[4]

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (044) 204-8225, e-mail: processor-w@ukr.net

Розглянуто використання V-мереж для оцінки одночасних подій з врахуванням часових обмежень, для покращення системної діагностики та енергоефективності та отримати глибше розуміння поведінки складних систем, виявити потенційні вузькі місця та оптимізувати розподіл ресурсів.

Ключові слова: *масштабування обчислень, V-мережі, енергоефективність.*

ORCID: [1]0000-0001-8884-8222; [2]0000-0003-0545-9980; [3]0009-0009-6805-2249; [4]0009-0004-5510-5536

Escalating energy costs and sustainability concerns in high-performance computing (HPC) and industrial-scale systems demand advanced models for energy-efficient operations. Traditional discrete event system (DES) models, while valuable tools, often struggle with the complexities of real-world systems, particularly when dealing with simultaneous events, partial sequences, and false positives. V-nets excel at handling concurrent events, incorporating temporal constraints, and accurately detecting partial sequences, leading to improved system diagnostics and energy efficiency.

This can lead to significant energy savings and improved system performance. For example, in HPC systems, V-nets can be used to monitor the energy consumption of individual components, identify idle resources, and optimize workload scheduling. In industrial settings, V-nets can help detect anomalies in production processes, leading to timely interventions and reduced downtime. As AI-driven workloads continue to grow in complexity, V-nets can play a crucial role in monitoring and optimizing energy consumption in these systems. Energy efficiency has been a key priority due to increased operational costs and environmental concerns [1]. Various approaches have been proposed, including hardware modifications, energy-sensitive software, and resource usage policies, all aimed at improving energy efficiency in these systems. Two widely adopted techniques in this domain are static power management (SPM) and dynamic power management (DPM). The implementation of AI and ML technologies in energy management has also opened new avenues for exploring novel approaches to optimize energy use. For example, advanced cooling technologies and waste heat reuse can further reduce energy consumption and operational costs, while ensuring the reliability and performance of computing systems. Simulations and workloads such as GROMACS (a molecular dynamics package), quantum mechanics calculations, or other scientific applications represent the type of compute-intensive operations that HPC systems typically handle. To fully leverage these advancements, a shift towards event-based diagnostics has been proposed [2]. This technique involves detecting sequences of discrete events that indicate either normal or abnormal behavior in HPC systems, thereby enabling more efficient energy management. Traditional discrete event models, such as Petri nets and automata, are commonly employed to understand the behavior of these systems. In response, innovative models, such as V-nets, have been developed to address these limitations by constructing temporal patterns and improving the identification of simultaneous and partial event sequences [3].

Definition. In discrete event systems, a label designating a noteworthy event usually represents an *event type*. Let the set of all potential event types be represented by E. Within a system, an *event type* might stand for a particular observation, action, or state change. It is expected that such tools will be particularly valuable as AI-based workloads become more pervasive, adding layers of complexity to the already massive computational tasks handled by HPC systems. To address the growing energy consumption of HPC systems, researchers have explored various techniques and technologies. However, several challenges remain. Table 1 presents a comparative analysis of the key research gaps in HPC energy efficiency and potential solutions.

Table 1. Research gaps in HPC energy efficiency

Research area	Key challenges	Potential solutions
Energy-Efficient Hardware	High energy consumption of hardware components, particularly GPUs and CPUs	Energy-efficient hardware designs, dynamic voltage and frequency scaling (DVFS), and advanced cooling techniques
Software-Based Energy Efficiency	Inefficient software and applicationworkloads	Energy-aware scheduling algorithms, workload consolidation, and virtualization techniques
AI and ML for Energy Efficiency	Leveraging AI and ML for predictive analytics and optimization	AI-powered energy management systems, predictive modeling, and reinforcement learning
Real-World Workload Analysis	Understanding the energy consumption patterns of real-world workloads	Using real-world workloads to benchmark energy efficiency and identify optimization opportunities
Event-Based Diagnostics and V-Net Models	Detecting and diagnosing anomalies in complex systems	Using V-net models to capture complex event sequences and improve fault detection

Example. Consider $a, b, c \in E$ representing event types such as process initiation, task completion, or specific conditions. Additionally, an *event type* can also be a logical combination of two or more other events. For instance, the event type $A=a.b$ signifies that event A occurs when both events a and b have transpired. A mathematical theory known as ''Time-stamped Observations Theory'' (TOT) is structured to create artificial cognitive agents known as abstractors. These agents use an Abstraction Problem Solving Method to analyze an input flow of timed messages and generate a minimal but relevant output flow of timed observations. Le Goc's Theory of Timed Observation applies Shannon's Theory of Communication to timed data and provides a distinct framework for Poisson Theories and Markov Chains. A process $P(t) = \{x_1(t), x_2(t),\ldots, x_n(t)\}$ of time functions ($x_i(t)$) is considered to be a dynamic system. A program monitors the evolution of these time functions, and $X = \{x_1, x_2,\ldots, x_n\}$ defines the collection of variable names. For each $\triangle x_i = \{\delta^i_1, \delta^i_2,\ldots \delta^i_m\}$, a collection of constants representing the potential values for x_i is constructed as follows: $\triangle = \bigcup_{\forall xi \in X} \triangle x_i$. Consider the collection of random time instants $\Gamma = \{t_k\}_{\in \Re}$. The V-nets model offers significant promise for application in supercomputing centers, where monitoring energy consumption during peak computational loads is critical. For instance, it could be utilized to identify inefficiencies in cooling systems during high-demand periods, potentially leading to optimized energy usage and substantial cost savings. Moreover, organizations engaged in training large language models (LLMs) could greatly benefit from the V-nets model. By detecting simultaneous event sequences during model training, V-nets could facilitate dynamic adjustments in resource allocation, resulting in energy cost reductions in the range of 15%–18%. In the manufacturing sector, the V-nets model could also play a transformative role in optimizing energy consumption within automated production lines. By analyzing event sequences related to machine operation and downtime, V-nets could help identify opportunities for implementing energy-saving measures, thereby reducing operational costs and improving system reliability. The implementation of the V-nets model would involve collecting various types of data, such as energy usage metrics and event logs, to inform its diagnostic capabilities.

REFERENCES

1. C. Silva, R. Vilaça, A. Pereira, R. Bessa, A review on the decarbonization of high-performance computing centers, Renew. Sustain. Energy Rev.189 (2024) 114019, http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2023.114019, URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123008778.

2. W. Lin, J. Lin, Z. Peng, H. Huang, W. Lin, K. Li, A systematic review of green-aware management techniques for sustainable data center, Sustain. Comput.: Inform. Syst. 42 (2024) 100989, http://dx.doi.org/10.1016/j.suscom.2024.100989, URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210537924000349.

M. Woodard, K. Marashi, S. Sedigh Sarvestani, A.R. Hurson, Survivability evaluation and importance analysis for cyber–physical smart grids, Reliab. Eng.Syst. Saf. 210 (2021) 107479, http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2021.107479,URLhttps://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0951832021000430.

2. A. Hurson, W. Shi, Introduction to special issue on Green and sustain-able computing, Sustain. Comput.: Inform. Syst. 22 (2019) 257–258, http://dx.doi.org/10.1016/j.suscom.2019.05.004, URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210537919301842.

3. F. Mantovani, et al., Performance and energy consumption of HPC workloadson a cluster based on Arm ThunderX2 CPU, Future Gener. Comput. Syst. 112(2020) 800–818, http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2020.06.033.

УДК 621.313.8

ВИСОКОШВИДКІСНИЙ ДВИГУН З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ДЛЯ МАЛОПОТУЖНИХ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

І. Я. Коваленко[1], М. А. Коваленко[2].

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37,
м. Київ, 03056, Україна,
Тел. +38-067-656-36-51, e-mail: kovalenko_ma@i.ua

Розроблено двовимірну чисельну коло-польову математичну модель безконтактного високошвидкісного двигуна з постійними магнітами. Модель розроблено для оцінки розподілу електромагнітного поля та вихрових струмів у конструктивних та активних елементах конструкції досліджуваного двигуна з метою визначення величини втрат при різних способах живлення. У роботі встановлено залежність втрат в окремих елементах конструкції досліджуваного двигуна при живленні від синусоїдального джерела напруги та при живленні від інвертора з ШІМ.

Ключові слова: *високошвидкісний двигун, математичне моделювання, постійні магніти, втрати в магнітному осерді, електромагнітний момент.*

HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET MOTOR FOR LOW-POWER RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

I. Kovalenko[1], M. Kovalenko[2],

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Beresteysky Ave., Kyiv, 03056
Tel./fax +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

A two-dimensional numerical ring-field mathematical model of a contactless high-speed motor with permanent magnets has been developed. The model is designed to estimate the distribution of the electromagnetic field and eddy currents in the structural and active elements of the design of the studied motor in order to determine the magnitude of losses for different power supply methods. The paper investigates the dependence of losses in individual elements of the design of the studied motor when powered from a sinusoidal voltage source and when powered from an inverter with PWM.

Keywords: *high-speed motor, mathematical modeling, permanent magnets, magnetic core losses, electromagnetic torque.*

ORCID: [1]0000-0003-1097-2041; [2]0000-0002-5602-2001.

Габаритні розміри електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМП) істотно залежать від швидкості обертання ротора чи частоти напруги живлення; відомо, що чим більша швидкість обертання, тим менші габаритні розміри. Застосування нових висококоерцитивних постійних магнітів, використання засобів з ЧПУ для виробництва ЕМП, приводить до появи нових типів електродвигунів, які відповідають зростаючим вимогам до енергоефективності, надійності та компактності [1, 2]. Водночас збільшення швидкості обертання двигунів вимагає підвищення точності їх проєктування та виготовлення, обумовлює збільшення втрат і нагріву; окремі питання пов’язані з динамічною стабільністю [4]. Для вирішення цих задач необхідно використовувати сучасні підходи, методи та засоби математичного моделювання, які забезпечують точний аналіз і дозволяють проводити оптимізацію параметрів двигуна [5]. Сучасні пакети прикладних програм для чисельного математичного моделювання дають змогу проводити розрахунки під час взаємодії електромагнітних, теплових і механічних процесів, що відбуваються в системі, та визначати їхній вплив на параметри та характеристики електродвигуна чи ЕМП.

Безконтактні високошвидкісні двигуни з постійними магнітами (БВДПМ) дедалі більше застосовуються у різноманітних галузях промисловості, на транспорті, в авіації, енергетиці, в електроінструментах, побутових пристроях, системах з відновлювальними джерелами енергії [6]. Вони мають певні ключові переваги, що є передумовою їх розповсюдження: висока питома потужність, мала вага, відносно невеликі габаритні розміри, відсутність механічних контактів і мінімальне технічне обслуговування завдяки зменшенню зносу. Ці двигуни використовуються також в різноманітних специфічних застосуваннях, де потрібні мінімальні габарити та вага, висока швидкість, точність і надійність.

Тривимірна геометрична модель прототипу досліджуваного безконтактного високошвидкісного двигуна з постійними магнітами наведена на рис. 1.

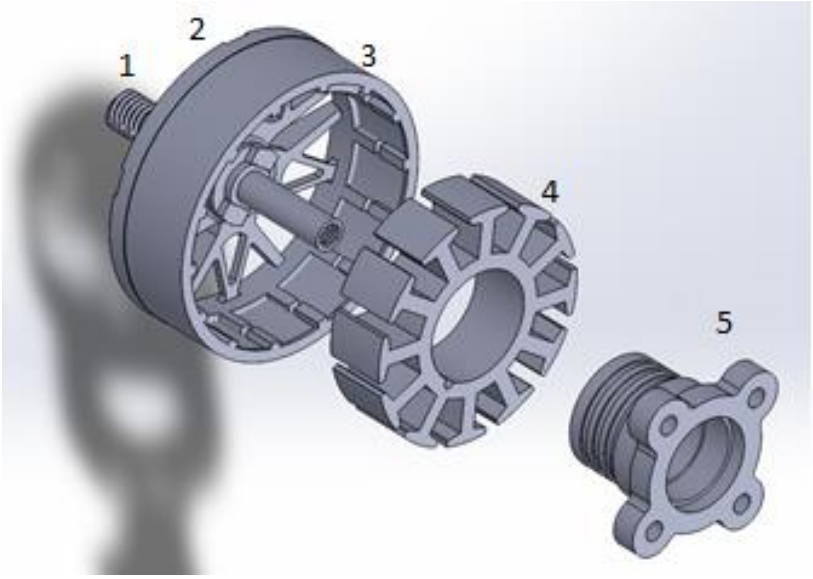


Рис. 1. Конструкція досліджуваного БВДПМ: 1 – вал ротора; 2 – торцева кришка ротора; 3 – втулка ротора з постійними магнітами; 4 – шихтоване магнітне осердя статора; 5 – втулка статора

Результати розрахунків показують, що при живленні двигуна від інвертора з ШІМ втрати зростають на ≈53–62 % залежно від швидкості обертання відносно випадку живлення від джерела з синусоїдальною напругою. Втрати в розрахунковій області при збільшенні швидкості обертання зростають не пропорційно: при збільшенні швидкості в 2 рази втрати зростають на ≈30 %; при збільшенні швидкості в 4 рази – на ≈260 %. При максимальних швидкостях обертання в 20000 об/хв втрати збільшуються в ≈5,4 раза порівняно зі швидкістю в 3000 об/хв. Локально найістотніші втрати зосереджені в магнітному осерді статора на зубцях, як найбільш насичених елементах магнітної системи. Загальні втрати на цих ділянках становлять ≈37 % сумарних розрахункових втрат.

При живленні від інвертора з ШІМ інтенсивність вихрових струмів у розрахунковій області зростає. Особливо струми і втрати зростають в зубцевій зоні магнітного осердя статора, де щільність магнітного потоку найбільша і де максимально проявляються вищі гармоніки від джерела живлення. Виявлено, що можливо зменшити кінцеву вартість готового виробу досліджуваного двигуна за рахунок використання прямокутної форми ПМ. Однак такий варіант буде гіршим від прототипу за тяговими характеристиками.

ПОСИЛАННЯ

1. Golovko V. M. Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator / V. M. Golovko, M. Ya. Ostroverkhov, M. A. Kovalenko, I. Ya.Kovalenko, D. V.Tsyplenkov. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022, (5): 074–079. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074.

2. Chumack V. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation / V. Chumack, V. Bazenov, O. Tymoshchuk, M. Kovalenko, S. Tsyvinskyi, I. Kovalenko, I. Tkachuk. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62. (ISSN 1729-3774).

4. Коваленко М., Ткачук І., Коваленко І., Жук С., Кришньов О., Перепелиця О., Тітов Є. (2024). Огляд двигунів для важких дронів. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (1 (11), 35–40. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.07.

5. Gerada, D.; Mebarki, A.; Brown, N.L.; Gerada, C.; Cavagnino, A.; Boglietti (2013). A High-speed electrical ma-chines: Technologies,trends, and developments. IEEE Trans. Ind. Electron., 61, 2946–2959 http://dx.doi.org/10.1109/TIE.2013.2286777.

6. Dong, Jianning & Huang, Yunkai & Jin, Long & Lin, Heyun. (2016). Comparative Study of Surface-Mounted and Interior Permanent-Magnet Motors for High-Speed Applications. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 26. 1-1. 10.1109/TASC.2016.2514342.

7. 6. Parivar, Hossein. (2022). An Overview of High-Speed Permanent Magnet Synchronous Machines; Materials, Losses, and Structures (SPM or IPM?). 10.13140/RG.2.2.24016.58884.

УДК 620.9

ASSESSING OPTIMAL SOLUTIONS TO KEEP UKRAINE'S THERMAL POWER SYSTEMS RUNNING DURING WARTIME

V. Khodakivskyi[1], D. Karpenko[1]

[1] Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
172 Antonovycha St., Kyiv, 03150, Ukraine,
e-mail: etzasu@gmail.com

This study analyzes strategies and technological solutions for maintaining Ukraine's thermal power systems amid wartime disruptions. It examines energy source diversification, equipment resilience, and heat supply optimization to mitigate infrastructure destabilization. The findings inform strategies to enhance energy security and ensure the sustainable operation of Ukraine's thermal power sector under conflict conditions.

***Keywords**: Cogeneration, Heat Supply, Wartime, Energy Security, Diversification, Decentralization, Resilience*

Introduction. The operation of thermal power plants (TPPs) and district heating (DH) systems in Ukraine during wartime is crucial for maintaining public services and critical infrastructure. Military actions, resource limitations, and economic instability require scientifically grounded strategies to ensure reliable energy supply. Preserving the existing DH infrastructure is more cost-effective than full reconstruction [1], while humanitarian aid is critical for the survival of district heating systems (DHS).

Objective. The ongoing military conflict in Ukraine poses significant challenges to the reliable operation of thermal power plants (TPPs) and district heating (DH) systems, which are critical for sustaining essential infrastructure. Given the risks of supply disruptions, physical damage to energy infrastructure, and economic instability, there is an urgent need to develop scientifically grounded strategies for enhancing system resilience. This study aims to evaluate optimal technological and economic solutions that ensure the continued operation of TPPs and DH networks.

Materials and results of the study. A comprehensive assessment of energy infrastructure vulnerabilities highlights several key directions for improving the resilience of Ukraine's thermal power sector. These include diversifying energy sources, implementing high-efficiency technologies, modernizing infrastructure, reforming market regulations, and adopting digitalization measures.

One of the primary strategies for energy stability is the diversification of fuel sources, particularly through the increased utilization of local and renewable energy sources (RES), such as biomass and biogas. This approach reduces dependence on imported fossil fuels and enhances energy security, while also contributing to sustainability goals [2]. Furthermore, the potential integration of hydrogen-based solutions into the thermal power sector offers additional opportunities for reducing carbon emissions and increasing energy autonomy.

Another essential component of the strategy involves the implementation of cogeneration (CHP) systems, which simultaneously generate heat and electricity. CHP technologies significantly improve energy efficiency and reduce emissions while ensuring decentralized energy production. Their effectiveness is particularly high when operating at a capacity utilization factor above 50% and an annual runtime exceeding 5,000 hours [3,4]. The integration of CHP units into district heating systems can enhance system flexibility, particularly under emergency conditions. Infrastructure modernization is another critical factor in ensuring reliable operation. The replacement of outdated equipment with energy-efficient and modular technologies reduces energy losses and increases system reliability.

In addition to infrastructure improvements, market liberalization plays a vital role in fostering the financial stability of the thermal power sector. Encouraging private investment, enhancing competition, and reducing excessive regulatory barriers can create a more efficient and resilient heating sector. However, regulatory mechanisms must be implemented to prevent monopolization and ensure fair market practices.

The digitalization of heat supply management presents another promising avenue for increasing operational efficiency. Smart metering and energy management systems [5,6] enable accurate demand forecasting, optimize resource allocation, and facilitate proactive maintenance. The adoption of automated monitoring technologies improves the ability to detect faults in real-time, enhancing overall system reliability. However, the successful implementation of such systems requires substantial investments in software, hardware, and cybersecurity measures.

International financial aid and humanitarian assistance play an essential role in supporting energy infrastructure recovery. The provision of financial resources through global organizations and donor programs can help minimize capital investment burdens and accelerate the rehabilitation of damaged heating networks.

Technological Solutions for Enhancing System Efficiency

Table presents key technological approaches aimed at enhancing the reliability of Ukraine's district heating systems under wartime conditions.

Table. A method to improve the stability of district heating

Technology	Description	Advantages	Disadvantages
Cogeneration (CHP)	Simultaneous production of heat and electricity from a single fuel source.	Increased efficiency, reduced emissions, decentralized energy production.	Requires maintenance, fuel-dependent.
Renewable Energy (RES)	Diversification of energy sources through biomass, biogas, and solar thermal systems.	Energy independence, emission reduction.	Seasonal variability, need for adaptation.
Power-to-Heat (P2H)	Conversion of surplus electricity (especially from RES) into thermal energy.	Balances grid load, contributes to decarbonization.	High investment costs, regulatory challenges.
Thermal Energy Storage (TES)	Storage of excess heat during low-demand periods for use during peak loads.	Peak load reduction, lower reserve capacity needs.	High capital expenditures, thermal losses.
Network Modernization	Replacement of outdated pipelines with insulated materials.	Reduced heat losses, increased reliability.	High initial investment, risk of network damage.
Energy Management (EMS)	Implementation of energy consumption monitoring and optimization systems.	Improved monitoring and control, consumer awareness.	Implementation and maintenance costs, staff training required.
Automated Control & Monitoring	Online system monitoring, fault detection, and hydraulic optimization.	Higher efficiency, rapid fault detection.	Expensive software and hardware, cybersecurity risks.

Conclusion

Ensuring the stable operation of Ukraine's thermal power systems during wartime requires a comprehensive approach that combines technological advancements, policy reforms, and international support mechanisms. The study highlights key strategies such as fuel diversification, cogeneration integration, infrastructure modernization, market liberalization, digitalization, and humanitarian assistance as fundamental to enhancing resilience and efficiency. Implementing these measures will strengthen the country's energy security, reduce operational costs, and ensure the long-term sustainability of district heating systems, even under conditions of limited resources and high uncertainty.

REFERENCES

1. Babak, V., & Kulyk, M. (2023). Increasing the efficiency and security of Integrated Power System operation through heat supply electrification in Ukraine. Science and Innovation, 19(5), 100–116. https://doi.org/10.15407/scine19.05.100
2. Havrylenko, Y., & Derii, V. (2024). Formation of legal framework for the functioning and development of green energy. System Research in Energy, 4(80), 120-133. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.120
3. Khodakivskyi, V., Karpenko, D. "Prospects for using combined heat and power plants and boiler houses to balance the integrated energy system of Ukraine" Technologies and Engineering, Vol. 25, No. 6, 2024
4. European Commission. (2024). Homepage. Retrieved January 3, 2025, from https://commission.europa.eu/index_en
5. Gao, J., Du, Z., Yang, S., Xu, Y., & Xu, S. (2024). Research on intelligent heating for urban systems based on digital twin. Journal of Physics: Conference Series, 2806, 012003. https://doi.org/10.1088/1742-6596/2806/1/012003
6. Karpenko, D., Yevtukhova , T., & Novoseltsev , O. (2024). METHOD FOR ASSESSING THE EFFICIENCY OF THE DISTRICT HEATING SYSTEM UNDER MARKET CONDITIONS . Vidnovluvana Energetika , (4(79), 6-16. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).6-16

УДК 621.311.1

ВИКОРИСТАННЯ МАТЕМАТИЧНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕЖИМІВ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

В. А. Баженов

Національний технічний Університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський просп., 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: +38(050)384-60-10, e-mail: v_bazenov@ukr.net

У роботі розглянуті питання використання математичних методів та алгоритмів для оптимізації режимів енергосистем з відновлюваними джерелами енергії, які забезпечують ефективне розв'язання поставлених задач, урахування обмежень при оптимізації.

Ключові слова: *електрична мережа, енергосистема, оптимізація розвитку, елементи мережі.*

USE OF MATHEMATICAL METHODS FOR OPTIMIZATION OF MODERN ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES

V. Bazhenov

National Technical University of Ukraine
"The Kiev Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky",
37, Beresteyskyy avenue, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: +38(050)384-60-10, e-mail: v_bazenov@ukr.net

The paper considers the use of mathematical methods and algorithms for optimizing power system modes with renewable energy sources, which ensure effective solution of the task, taking into account constraints during optimization.

Keywords: *electric network, power system, optimization of development, network elements.*

ORCID 0000-0003-1622-5207

Метою роботи є розробка методів та алгоритмів оптимізації режимів електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії, що забезпечують ефективне вирішення поставленої задачі оптимізації, виконання технічних та ресурсних обмежень. Загальна задача оптимізації режимів електричної мережі програмування зводиться до мінімізації

$$f(X)\ ,\ X \in E^n \tag{1}$$

за наявності обмежень у вигляді рівностей

$$f_i(X) = 0\ \ ,\ \ i = 1,2,...,m \tag{2}$$

і обмежень у вигляді нерівностей

$$g_i(X) \geq 0\ \ ,\ \ i = m+1, m+2,...,P \tag{3}$$

Використання градієнтного методу ускладнене в разі витягнутого простору, коли лінії рівнів цільової функції утворюють витягнутий «яр». У цьому разі напрямок антиградієнта майже ортогональний напрямку досягнення мінімуму *f (X*), і розв'язок задачі або потребує значних витрат часу розрахунку, або взагалі не може бути отриманий. У цьому разі процедура швидшого спуску покращується масштабуванням складових градієнта. При цьому перехід від точки $X^{(k)}$ до точки $X^{(k+1)}$ описується виразом:

$$X^{(k+1)} = X^{(k)} - \xi^{(k)} a_{jд} \nabla f(X^{(k)}), \tag{4}$$

де $\xi^{(k)}$ **–** коефіцієнт довжини кроку**;** $a_{jд}$ **–** діагональна матриця множників. Оптимальний коефіцієнт довжини кроку може визначатися в кожній із точок траєкторії руху чисельним або аналітичним рішенням рівняння

$$\frac{\partial f(X^{(k)} - \xi^{(k)} a_{jд} \nabla f(X^{(k)})}{\partial \lambda} = 0. \tag{5}$$

Оскільки мінімум цільової функції $f(X)$ не досягається за один крок спуску, перехід (4) повинен повторюватись необхідну кількість разів

Для врахування функціональних обмежень при оптимізації режимів електричних систем доцільно використовувати комбінований метод штрафних функцій, який дозволяє призначати як зовнішні штрафи при порушенні обмежень

так і внутрішні – при наближенні до границь допустимої області. При цьому обмеження за незалежними змінними враховуються за допомогою методу утримуючих обмежень. При використанні комбінованого методу штрафних функцій задача оптимізації режиму перетворюється на послідовність задач, кожна із яких не має обмежень. З цією метою множина індексів усіх функціональних обмежень розбивається на дві підмножини. Перша з них включає в себе індекси обмежень, яку були порушені

$$A = \left\{ p \in \{1,2,...,P\} \middle| \varphi_p(X) \geq \varphi_p^{\max} \ або \ \varphi_p(X) \leq \varphi_p^{\min} \right\}, \tag{6}$$

а друга – індекси обмежень, які виконані в початковій точці пошуку

$$B = \left\{ p \in \{1,2,...,P\} \middle| \varphi_p^{\min} < \varphi_p < \varphi_p^{\min} \right\}, \tag{7}$$

Цільова функція, що мінімізується, записується у вигляді

$$\bar{\Phi}(X) = f(X) + \frac{1}{\varepsilon'} P'(X) + \varepsilon'' P''(X), \tag{8}$$

де ε' та ε'' – коефіцієнти штрафу.

Зовнішні штрафні функції призначають штрафи в разі порушення обмежень, індекси яких входять у підмножину *A:*

$$P'(X) = \sum_{p \in A} (\varphi_p(X) - \varphi_p^{np})^2, \tag{9}$$

де $\varphi_p(X)$ – залежні характеристики режиму в точці пошуку, що розглядається; φ_p^{np} – порушена межа зміни *p*-ї характеристики.

Внутрішні штрафні функції призначають штрафи при наближенні залежних характеристик до меж допустимої області та визначаються для обмежень, індекси яких входять у підмножину *B,*

$$P''(X) = \sum_{p \in B} \left(\frac{1}{\varphi_p(X) - \varphi_p^{\min}} + \frac{1}{\varphi_p^{\max} - \varphi_p(X)} \right). \tag{10}$$

Початкові значення коефіцієнтів штрафу ε' та ε'' розглядаються на першому циклі оптимізації як відношення довжин векторів $\nabla f(X)$, $\nabla P'(X)$ ma $\nabla P''(X)$ та розраховуються за формулами

$$\varepsilon'^{(1)} = \frac{\left\| \nabla P'(X) \right\|}{\left\| \nabla f(X) \right\|}; \ \varepsilon''^{(1)} = \frac{\left\| \nabla f(X) \right\|}{\left\| \nabla P''(X) \right\|}. \tag{11}$$

У цілому процес оптимізації будується так. За початкових значень $\varepsilon'^{(1)}$ та $\varepsilon''^{(1)}$ визначаємо точку мінімуму функції $X^{(1)}$. В отриманій точці перевіряється виконання обмежень по незалежним змінним. Обмеження, які не задовольняються в цій точці, називаються утримуючими. Для того щоб задовольнити їх, фіксуємо відповідні компоненти вектора $X^{(1)}$ на порушених межах. Потім знаходимо нові коефіцієнти $\varepsilon'^{(2)}$ та $\varepsilon''^{(2)}$ і знову визначаємо точку відносно мінімуму цільової функції $X^{(2)}$. Далі необхідно уточнити склад утримуючих обмежень. Залежно від значень часткових похідних $\frac{\partial \bar{\Phi}(X^{(k)})}{\partial x_j}$ деякі обмеження, які раніше були включені до складу утримуючих, можна виключити з розгляду. Якщо їх склад залишився незмінним та функціональні обмеження враховані, то на цьому оптимізаційний процес завершується. Якщо ні, то необхідно знову розрахувати коефіцієнти штрафу, визначити положення точки відносного мінімуму функції (5.18), уточнити склад уточнюючих обмежень.

Таким чином, для врахування обмежень при оптимізації встановлених режимів електричних систем може використовуватись комбінований алгоритм, в якому обмеження за незалежними змінними оптимізації враховуються за допомогою метода утримуючих обмежень, а обмеження за залежними змінними – за допомогою комбінації методів внутрішніх та зовнішніх штрафних функцій. Розглянутий алгоритм, який базується на використанні комбінованого методу штрафних функцій, забезпечує врахування обмежень при оптимізації режимів електричних систем, має достатню швидкість збіжності та потребує незначних витрат пам'яті ЕОМ.

ПОСИЛАННЯ

1. Баженов В. А. Моделювання електричної мережі при оптимізації розвитку енергосистем. Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Проблеми сучасної електротехніки. Частина 5. К.: Ін-т електродинаміки НАН України, 2006. С. 9–12.

2. Кузнецов В. Г. Оптимизация режимов электрических сетей / В. Г. Кузнецов, Ю. И. Тугай, В. А. Баженов. К.: Наук. думка, 1992. 216 с.

УДК 620.92

АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВНИХ НАПРЯМІВ БІОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ В РОЗРІЗІ ДИРЕКТИВИ ЄС З ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ RED III

Т. А. Желєзна

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. М. Капніст, 2А, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (067) 588-55-85, e-mail: zhelyezna@uabio.org

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення вітчизняних та зарубіжних джерел літератури з відповідних питань.

Ключові слова: *біоенергетика, біопаливо, сталі авіаційні палива, біогаз, біометан, проміжні культури.*

Директива ЄС з відновлюваної енергетики (RED III) [1] визначає обов'язкову ціль Євросоюзу 2030 року – щонайменше 42,5 % відновлюваної енергії у валовому кінцевому енергоспоживанні з намаганням на практиці досягти 45 %. Щодо обов'язкових цілей для сектору транспорту є два варіанти виконання – щонайменше 29 % енергії з відновлюваних джерел у кінцевому споживанні енергії або скорочення викидів парникових газів на 14,5 % порівняно з базовим рівнем, який визначається для кожної країни – члена ЄС

Біоенергетика є значною складовою відновлюваної енергетики; її важливість визначається здатністю заміщувати широкий спектр викопних палив та скорочувати викиди парникових газів. В ЄС-27 частка біомаси у валовому кінцевому енергоспоживанні становить майже 13 %, при цьому з біомасі виробляється близько 55 % загального обсягу відновлюваної енергії [2].

Перспективні напрями розвитку європейської біоенергетики визначаються багато в чому положеннями Директиви RED III. Враховуючи євроінтеграційний курс України, ці положення є важливим і для неї. Іншим аспектом є структура енергетичного потенціалу біомаси України, в якому стабільно превалює біомаса сільськогосподарського походження [3]. З огляду на це розглянемо насамперед положення Директиви RED III, що стосуються агробіомаси.

Додаток IX Директиви ЄС з відновлюваної енергетики містить перелік видів сировини для виробництва рідких біопалив та біогазу для транспорту, внесок яких до виконання цілі ЄС зараховується подвійно по енергетичному вмісту. При цьому рідкі біопалива, отримані з сировини з частини А Додатку IX, вважаються передовими (II-го покоління), а обсяг рідких біопалив та біогазу з сировини з частини Б Додатку IX певним чином обмежується.

Для України становить інтерес і може бути перспективним напрямом біоенергетики виробництво рідких біопалив та біогазу з проміжних культур. Проміжними називають культури, які вирощуються в інтервалі часу, вільного від вирощування основних культур сівозміни. За рахунок таких посівів з однієї площі протягом року можна мати два врожаї [4]. Проміжні культури (міжпосівні, покривні) як сировина включені до частини А Додатку IX RED III, якщо з них отримують рідке біопаливо для авіації, а якщо ні – до частини Б. Це розділення свідчить про те, що в ЄС приділяють особливу увагу виробництву авіаційних біопалив. Це підтверджується й внесенням іншого виду сировини до Додатку IX – рослин, вирощених на сильно деградованих землях, за винятком харчових і кормових культур. У разі використання для отримання рідкого біопалива для авіації ця сировина потрапляє до частини А, в іншому разі – до частини Б. У Директиві RED III визначено, що «сильно деградовані землі – землі, які протягом значного періоду часу були сильно засолені або мали дуже низький вміст органічної речовини та були сильно еродовані». В Україні є такі землі, і внаслідок воєнних дій їх площа тільки збільшується.

Зараз існує до десятка технологій виробництва сталих авіаційних біопалив, затверджених стандартом ASTM D1655 [5]. Комерційного рівня досягли технології отримання синтетичного парафінового керосину (SPK) з гідроочищених етерів та жирних кислот (авіаційне біопаливо HEFA-SPK) і SPK за технологією газифікації біомаси з наступним синтезом Фішера – Тропша (біопаливо FT-SPK) [6]. Відповідно до стандарту ASTM D1655 біопаливо HEFA-SPK виробляється з олійної сировини (використана харчова олія, нехарчові рослинні олії, тваринні жири), а біопаливо FT-SPK – з лігноцелюлозної сировини (відходи сільського / лісового господарства, енергетичні рослини). З погляду цього з боку України як сировину для авіаційних біопалив можна запропонувати олійну культуру рижій. Її можна вирощувати як проміжну культуру в існуючих сівозмінах сільськогосподарських культур або як енергетичну рослину на деградованих землях. Перевагою рижію є те, що його олію використовують переважно для технічних цілей і значно рідше – для харчових. Завдяки цьому є можливість довести, що рижій не є харчовою культурою, і його застосування

як сировини для рідких біопалив є сталим і не створює конкуренції продуктам харчування. Отже, насіння рижію (олія) може використовуватися для виробництва HEFA-SPK, а солома (лігноцелюлозна біомаса) – для FT-SPK.

Поки немає умов для споживання авіаційного біопалива в Україні, воно може експортуватися в Євросоюз та інші країни світу. В ЄС прийнято обов'язкову ціль, що частка сталих авіаційних палив (САП – біопалива й синтетичні палива) в авіаційному паливі, що перебуває в аеропортах ЄС, має становити 2 % з 2025 р. і 70 % – з 2050 р. При цьому частка саме синтетичних палив має становити 1,2 % з 2030 р. і 35 % – з 2050 р. [7]. З цих цифр видно значну роль біопалив у забезпеченні можливості виконання цілей щодо частки САП. Цілі по декарбонізації сектору авіації є не тільки в ЄС, але й на глобальному рівні. Так, Міжнародна асоціація повітряного транспорту (IATA) поставила за мету досягти вуглецевої нейтральності авіаційної галузі до 2050 р., і внесок САП у забезпечення цього оцінюється у 65 % [8]. Такий внесок вимагає наявності САП в обсязі майже 450 млрд л у 2050 р., тоді як поточний рівень виробництва у світі становить менше 300 млн л/рік [9, 10]. Таким чином, можна прогнозувати, що в разі потреби Україна зможе без проблем знайти ринки для експорту САП вітчизняного виробництва.

Іншим перспективним напрямом для біоенергетики України є виробництво біогазу / біометану з проміжних культур. Використання саме проміжних культур дає змогу істотно збільшити об'єм сировинної бази. За оцінкою фахівців Інституту технічної теплофізики НАН України, поточний потенціал виробництва біогазу становить близько 9,6 млрд м^3 CH_4/рік [3]. Якщо залучити до сировинної бази біомасу проміжних культур, вирощених на 20%-му ріллі, то це додатково дасть 9,3 млрд м^3 CH_4/рік (консервативна оцінка), тобто практично подвоїть існуючий потенціал [4]. З одного боку, в Україні є значний досвід виробництва біогазу / біометану, з іншого – досвід вирощування проміжних культур для виробництва кормів, який можна використати й для вирощування сировини для потреб біоенергетики. Поєднання напрацьованого практичного досвіду в цих двох сферах з додатковим урахуванням питань сталості дає можливість започаткувати виробництво біогазу / біометану з проміжних культур.

Підсумовуючи вищевикладене, в розрізі положень Директиви RED III можна виділити такі перспективні напрями для біоенергетики України, які водночас є інноваційними: виробництво авіаційних біопалив (HEFA-SPK, FT-SPK), біогазу, біометану з проміжних культур та з енергетичних рослин, вирощених на деградованих землях. На сьогодні з цього переліку найближчим до реалізації видається виробництво біогазу / біометану з проміжних культур.

ПОСИЛАННЯ

1. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast). URL: http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/2024-07-16 (дата звернення: 03.03.2025).
2. Geelen J., Canon J. Bioenergy Landscape. Bioenergy Europe Statistical Report, 2024.
3. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Кучерук П. П., Драгнєв С. В. Аналіз перспективних напрямків використання енергетичного потенціалу біомаси України. Теплофізика та теплоенергетика. 2023, т. 45, № 2, с. 77-86. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2023.9
4. Желєзна Т. А., Драгнєв С. В. Аналіз підходів до використання проміжних культур як сировини для виробництва біометану в Україні. Енергетика і автоматика. 2024, № 3, с. 121-131. http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.121
5. ASTM D1655-24. Standard Specification for Aviation Turbine Fuels.
6. Желєзна Т. А., Драгнєв С. В., Баштовий А. І. Перспективи використання біопалив другого покоління як авіаційного палива. Теплофізика та теплоенергетика. 2022, т. 44, №2, с. 54-63. https://doi.org//10.31472/ttpe.2.2022.7
7. Regulation (EU) 2023/2405 of the European Parliament and of the Council of 18 October 2023 on ensuring a level playing field for sustainable air transport (ReFuelEU Aviation). URL: http://data.europa.eu/eli/reg/2023/2405/oj (дата звернення: 03.03.2025).
8. Net zero 2050: sustainable aviation fuels. IATA, 2024. URL: https://bit.ly/41udrNE (дата звернення: 03.03.2025).
9. Susan van Dyk, Jack Saddler. Project Report: Update on developments in SAF/biojet fuel commercialisation. IEA Bioenergy Task 39 seminar, 10.10.2024.
10. Susan van Dyk, Jack Saddler. Progress in Commercialization of Biojet /Sustainable Aviation Fuels (SAF): Technologies and policies. IEA Bioenergy: Task 39, 2024. URL: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2024/06/IEA-Bioenergy-Task-39-SAF-report.pdf (дата звернення: 03.03.2025).

УДК 621.316.9

ОГЛЯД НАСЛІДКІВ НЕТИПОВИХ ВИПАДКІВ УРАЖЕННЯ БЛИСКАВКОЮ ПОВІТРЯНИХ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Є. О. Троценко[1], Я. А. Архипов[2]

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
Просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

У доповіді аналізуються наслідки нетипових випадків ураження блискавкою повітряних ліній електропередачі, зокрема у зв'язку з підвищенням грозової активності через зміни клімату. Розглянуто виклики для енергетичних мереж, випадки відключень та необхідність впровадження ефективних заходів захисту.

Ключові слова: *блекаут, захист від блискавки, зимова блискавка, повітряні лінії електропередачі, розумні мережі.*

OVERVIEW OF THE CONSEQUENCES OF UNTYPICAL INCIDENCES OF LIGHTNING STRIKES ON OVERHEAD POWER LINES

Y. Trotsenko[1], Y. Arkhypov[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

The report analyzes the consequences untypical incidences of lightning strikes on overhead power lines, particularly in relation to the increase in thunderstorm activity due to climate change. It examines the challenges for energy networks, instances of outages, and the need for implementing effective protection measures.

Key words: *blackout, lightning protection, winter lightning, overhead power lines, smart grids.*

ORCID: [1]0000-0001-9379-0061; [2]0009-0003-6396-3189.

Грозова активність (або активність розрядів блискавки, як її частіше називають в англомовній літературі) розглядається як один із показників зміни клімату [1]. Грозова активність тісно пов'язана з конвективними процесами в атмосфері, які своєю чергою залежать від температури. Підвищення середньої глобальної температури призводить до збільшення вологості та нестабільності атмосфери, що може сприяти частішому утворенню гроз. Згідно з двома останніми звітами про грозову активність [2, 3], у 2024 році кількість розрядів блискавки на планеті зросла більш ніж на 125 мільйонів, перевищивши 2,227 мільярда спалахів. Для порівняння, у 2023 році цей показник становив близько 2,102 мільярда [2]. Зростання грозової активності неминуче підвищує ризик ураження блискавкою наземних об'єктів. У цьому контексті, в межах концепції впровадження «розумних мереж» в Україні до 2035 року [4], інженерам-енергетикам доцільно ознайомитися з нетиповими випадками ураження блискавкою об'єктів електроенергетики у світі, зокрема повітряних ліній електропередачі.

У січні 2022 року в Республіці Польща вперше зафіксували випадки відключення повітряних ліній електропередачі напругою 220 та 400 кВ через удари зимової блискавки [5]. Зимовою блискавкою (англ. winter lightning) називають грозові розряди, що виникають у холодну пору року, зазвичай при температурах близько або нижче 0°C. На відміну від звичайних літніх гроз, зимові блискавки частіше супроводжують снігопади, крижаний дощ або холодні фронти. Зимові грози трапляються значно рідше за літні, оскільки холодне повітря менш сприятливе для утворення висхідних конвективних потоків, необхідних для розвитку грозових хмар. Зимові блискавки традиційно спостерігаються в Японії, особливо на узбережжі Японського моря [6, 7], однак останні дані свідчать про зростаючу увагу до цього явища з боку Європейських енергетичних компаній та інженерів. Висока амплітуда струму та тривалість розрядів зимової блискавки становлять значний ризик для надійності електромереж, що може потребувати впровадження спеціальних заходів захисту. Блекаут (масштабне аварійне знеструмлення) може бути спричинений різними факторами, які порушують роботу електроенергетичної системи, серед яких окреме місце посідають розряди

блискавки. У роботах [8, 9] описано випадок, коли блекаут був викликаний множинними ударами блискавки в коридор, що складається з трьох повітряних ліній електропередачі напругою 500 кВ. Внаслідок інциденту сім електростанцій перейшли в острівний (ізольований) режим роботи, відбулося масштабне відключення споживачів електроенергії в Британській Колумбії, Канада, та мало місце пошкодження обладнання. На одній із ліній сталося подвійне замикання на землю, а на двох інших – однофазні замикання на землю [8, 9]. Енергетикам знадобилося більше трьох годин, щоб усунути аварію та повністю відновити систему до стану, що передував відключенню. Під час цього інциденту та його ліквідації було зафіксовано декілька незвичайних явищ, зокрема виникнення феророзонансу і перенапруги внаслідок ефекту Ферранті, коли напруга в кінці довгої лінії електропередачі перевищує напругу на її початку. Останнє виникло на двох лініях менших класів напруги через ненавмисні дії оператора системи передачі під час відновлення енергосистеми [8, 9].

Можна стверджувати, що захист від блискавки залишається важливою та актуальною задачею для повітряних ліній електропередачі, особливо в межах концепції впровадження «розумних мереж» [10]. Інтелектуальні енергомережі, що поєднують новітні технології моніторингу та автоматизованого управління, вимагають підвищеного рівня захисту від природних явищ, таких як блискавка. У разі удару блискавки на критичних ділянках мережі можуть виникати серйозні пошкодження обладнання та перерви в електропостачанні. Тому розробка ефективних систем захисту від блискавки є необхідною умовою для забезпечення надійності та безперебійної роботи систем Smart Grid, що так само сприятиме стабільному функціонуванню енергетичної інфраструктури в умовах зміни клімату. У підсумку можна додати, що проведений огляд може бути корисним для інженерів служби ізоляції та захисту від перенапруги, інженерів служби підстанцій, інженерів служби розподільних мереж, а також для інженерів-енергетиків загалом.

ПОСИЛАННЯ

1. N. Reeve, R. Toumi, "Lightning activity as an indicator of climate change", Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1999, vol. 125, no. 555, pp. 893-903, doi: 10.1002/qj.49712555507.
2. Vaisala Xweather Annual Lightning Report 2023. Total lightning statistics. URL: https://indd.adobe.com/view/ddf9619e-36e0-46b4-981d-3458b2532b98 (дата звернення: 03.03.2025).
3. Vaisala Xweather Annual Lightning Report 2024. Total lightning statistics. URL: https://indd.adobe.com/view/97f5506f-f312-493b-a9d2-d6f3bd06408a (дата звернення: 03.03.2025).
4. Про схвалення Концепції впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року: Розпорядження кабінету міністрів України від 14 жовтня 2022 року № 908-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/908-2022-р#Text (дата звернення: 03.03.2025).
5. K. Lenarczyk, M. Loboda, "Shutdowns of 220 kV and 400 kV power transmission lines caused by winter lightning strikes in Poland in January 2022", 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2022, pp. 20-25, doi: 10.1109/ICLP56858.2022.9942605.
6. M. Matsui, K. Michishita, S. Yokoyama, "Lightning ground flash density and evaluation of lightning risk for wind turbines in coastal areas of the Sea of Japan", 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, Poland, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/ICLP.2018.8503385.
7. M. Matsui, N. Honjo, K. Michishita, S. Yokoyama, "Characteristics of lightning discharges to wind turbines and weather conditions at upper air in winter in Japan", 2023 12th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Langkawi, Malaysia, 2023, pp. 1-6, doi: 10.1109/APL57308.2023.10181380.
8. A. M. Mousa, M. Nagpal, Z. Jiao, "A blackout caused by multiple lightning strikes to a lightly-loaded interconnection consisting of three 500 kV power lines in a joint corridor", 2018 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, Poland, 2018, pp. 1-8, doi: 10.1109/ICLP.2018.8503357.
9. M. Nagpal, T. G. Martinich, Z. Jiao, S. -H. Manuel, H. A. Zhang, A. Alimardani, "Lessons learned from a regional system blackout and restoration in BC hydro", IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, vol. 33, no. 4, pp. 1954-1961, doi: 10.1109/TPWRD.2017.2768046.
10. Є. О. Троценко, Я. А. Архипов, "Розумні мережі та захист повітряних ліній електропередачі від блискавки", Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, 22–24 травня 2024 року, 2024, С. 139-140, doi: 10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024.

УДК 004.621.311.25

СИСТЕМА ВИБОРУ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВАРІАНТІВ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ НА БАЗІ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ І ГАЗОВИХ КОТЛІВ ДЛЯ ЖИТЛОВИХ ТА АДМІНІСТРАТИВНИХ БУДІВЕЛЬ УКРАЇНИ

В. М. Мамалига[1], І. В. Сегеда[2], В. П. Головань[3]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
вул. Політехнічна, 6, Київ, Україна, 02000,
тел.: (067) 905-59-60, e-mail: v.mamalyga@gmail.com
phone: (050) 695-54-44, e-mail: Irynaseg@gmail.com
тел.: (099) 704-60-13, e-mail: holovan.volodymyr@lll.kpi.ua

Представлена система призначена для комплексного аналізу та вибору оптимальних варіантів теплопостачання. Вона враховує низку факторів: енергоефективність, витрати на встановлення та експлуатацію, зовнішній вплив. Система дає можливість користувачам здійснювати швидку і точну оцінку різних сценаріїв опалення, використовуючи сучасні методи обчислення та прогнозування.

Ключові слова: *теплопостачання, енергоефективність, тепловий насос, газовий котел, оптимізація енергоспоживання, програмна система.*

SYSTEM FOR SELECTING ALTERNATIVE HEAT SUPPLY OPTIONS BASED ON HEAT PUMPS AND GAS BOILERS FOR RESIDENTIAL AND ADMINISTRATIVE BUILDINGS IN UKRAINE

V. Mamalyga[1], I. Segeda[2], V. Holovan[3]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Prospect Beresteiskyi,37, Kyiv, 03056, Ukraine

The presented system is designed for comprehensive analysis and selection of optimal heat supply options. It takes into account a number of factors: energy efficiency, installation and operating costs, and external influences. It allows users to quickly and accurately evaluate various heating scenarios using modern methods of calculation and forecasting.

Keywords*: heat supply, energy efficiency, heat pump, gas boiler, energy consumption optimization, software system.*

ORCID: [1]0000-0003-3650-2574; [2]0000-0003-1958-4985; [3] 0009-0003-7124-6075.

Система вибору альтернативних варіантів системи теплопостачання на базі теплових насосів і газових котлів для житлових та адміністративних будівель є програмним комплексом. Її основне завдання — автоматизація процесу прийняття рішень щодо оптимального варіанта системи опалення з урахуванням технічних, економічних та екологічних факторів. Система може бути інструментом для інженерів, експертів у сфері теплопостачання, власників будівель а також пересічного споживача, які прагнуть знайти найефективніше рішення для забезпечення теплопостачання об'єктів інфраструктури.

Головною особливістю системи є можливість інтерактивного аналізу різних сценаріїв опалення. Програма дозволяє користувачеві вводити вхідні параметри, як от тип будівлі, її площа, рівень теплоізоляції, кліматичні умови регіону, доступність енергоресурсів, а також поточні та прогнозовані ціни на газ і електроенергію. На основі цих даних алгоритм оцінює різні варіанти теплопостачання, порівнюючи їх за вартістю експлуатації [1], рівнем впливу на довкілля [2] та енергетичною ефективністю [3, 4].

Система побудована з використанням сучасних програмних технологій. Її графічний інтерфейс буде розроблений на основі мови програмування C# з використанням платформи .NET, що забезпечить високу продуктивність, зручність взаємодії та підтримку роботи на різних операційних системах Windows. Для зберігання та обробки вхідних і вихідних даних використовується реляційна база даних, така як MySQL. Це дозволяє зберігати історію розрахунків, здійснювати аналітику на основі накопичених даних та інтегрувати програму з іншими системами управління енергоспоживанням.

Ключовим елементом системи є аналітичний модуль, що функціонує на основі багатокритеріальних методів оцінки. Зокрема, використовуються алгоритми аналізу ієрархій (AHP – Analytic Hierarchy Process), методи оптимізації на основі критеріїв вартості життєвого циклу (LCC – Life Cycle Costing) [1], а також інструменти оцінки екологічного впливу [2]. Такі підходи дозволяють не лише визначати найвигідніший варіант у конкретний момент часу, але й прогнозувати ефективність різних систем у довгостроковій перспективі. Схема програмних модулів представлена на рис. 1.

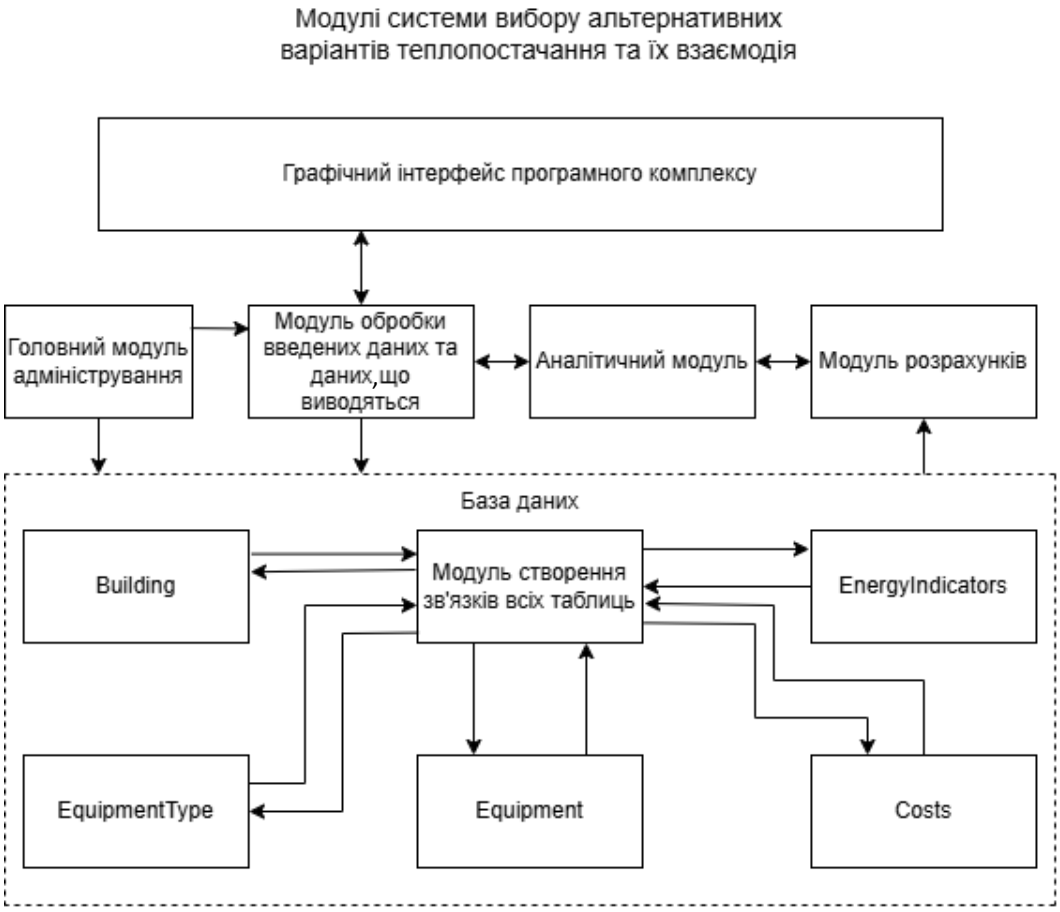


Рис. 1. Схема програмних модулів системи

Розроблена система сприятиме зниженню витрат на енергію для користувачів, підвищенню загальної ефективності теплопостачання та зменшенню викидів парникових газів [2]. У перспективі можливе розширення функціоналу за рахунок можливості застосування інших типів теплогенерувального обладнання, зокрема біопаливних котлів, гібридних систем, що поєднують кілька джерел енергії, а також сонячних теплових установок.

Запропонована система може стати ефективним інструментом для інженерів та кінцевих споживачів, які розробляють оптимальне рішення для теплопостачання своїх об'єктів, враховуючи економічні, технічні та екологічні аспекти.

ПОСИЛАННЯ

1. Окупність теплового насоса: терміни та формули. URL: https://raymer.com.ua/srok-okupaemosti-teplovogo-nasosa-voda/ (дата звернення: 13.02.2025).
2. Розрахунок та аналіз системи сонячного гарячого водопостачання в програмному середовищі RETScreen. URL: https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f54c28ef-6888-4cab-9d2b-fb9bfd3fc05f/content (дата звернення: 13.02.2025).
3. Ефективність теплового насоса. URL: https://teplonasos.kiev.ua/ua/ehffektivnost-teplovogo-nasosa/ (дата звернення: 13.02.2025).
4. Розрахунок потужності газового котла для приватного будинку – для одно- і двоконтурної схеми. URL: https://homelights.org/uk/4051-rozrahunok-potuzhnosti-gazovogo-kotla-dlya-pryvatnogo (дата звернення: 13.02.2025)

УДК 621.311.25

ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМ МОНІТОРИНГУ, УПРАВЛІННЯ ТА ЗАХИСТУ В АКУМУЛЯТОРНИХ БАТАРЕЯХ

І. Я. Коваленко[1], Л. Г. Горовий[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського», просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
e-mail: 2048141@ukr.net, leonidhorovyi1@gmail.com

Наведено функції застосування систем моніторингу та контролю акумуляторних батарей для підвищення безпеки, ефективності та тривалості їх використання.

Ключові слова: *акумулятор, акумуляторна батарея, електроенергія, балансування, експлуатація, ефективність, функції, заряджання, розряджання, ємність.*

USING A MONITORING, CONTROL AND PROTECTION SYSTEM IN BATTERIES

I. Kovalenko[1] , L. Horovyi[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteiskyi Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
e-mail: 2048141@ukr.net, leonidhorovyi1@gmail.com

The functions of using battery monitoring and control systems to improve the safety, efficiency, and duration of their use are outlined.

Key words: *accumulator, battery, electricity, balancing, operation, effisiency, functions, charging, discharging, capacity.*

Акумуляторні батареї бувають різних типів залежно від хімічного складу елемента, використовуваних хімічних речовин тощо. Ємність, розмір, вага, номінальна напруга, номінальна сила струму, рейтинг С, ESR (еквівалентний послідовний опір, ефективність, стан заряджання, стан розрядки, тривалість циклу, термін служби – це кілька факторів, які слід враховувати під час вибору акумулятора для експлуатації [1].

Акумулювання енергії для подальшого її використання в необхідний момент, є невід'ємною частиною сучасного світу, технологічного та економічного прогресу. Зокрема, поширеним є використання електричних акумуляторів – хімічних джерел струму багаторазової дії, особливість яких полягає в зворотності внутрішніх хімічних процесів.

Акумулятори, накопичуючи в собі велику кількість енергії, за неправильних умов експлуатації можуть не тільки вийти з ладу, але й нанести шкоду оточуючому обладнанню, приміщенням та людям. Тому системи моніторингу та контролю мають бути обов'язковою складовою як збірок, так і окремо працюючих елементів для запровадження безпеки їх експлуатації [2].

На рис. 1 показана схема основних завдань системи моніторингу та контролю акумуляторів, які спрямовані на підвищення безпеки, ефективності та тривалості експлуатації.

Для досягнення необхідних параметрів резерву електроенергії, акумулятори об'єднують в збірки – батареї. Під час їх експлуатації, проявляється вплив неоднаковості властивостей елементів, що особливо критично для акумуляторів при послідовному з'єднанні. Ці відмінності викликають розбіжності станів заряду (напруг) на комірках батареї. Одні будуть перезаряджатися, інші – перерозряджатися, в обох випадках вихід за межі номінальних робочих напруг призведе до пришвидшеного виходу з ладу елементів.

Щоб запобігти цьому явищу зазвичай як компонент системи контролю використовують схеми балансування, вирівнювання напруги послідовно з'єднаних елементів (рис. 2). Вони дозволяють максимізувати доступну корисну ємність батареї та запобігти недостатньому чи надмірному рівню заряду окремих акумуляторів.

За принципом реалізації процесу існує два типи методів балансування [3]:

- Пасивне. Розсіювання енергії заряджених акумуляторів шляхом підключення до навантаження – розрядних резисторів. Метод простий, доступний і надійний, оскільки потребує порівняно малої кількості компонентів.

Рис. 1. Функції системи моніторингу та контролю акумуляторних батарей

Але недоліком є порівняно низька ефективність через розсіювання енергії в формі тепла під час вирівнювання напруг. Тому цей варіант реалізації підходить для малопотужних батарей з низьким енергоспоживанням.

- Активне. Переміщення енергії від більш заряджених елементів до менш заряджених за допомогою складних схем, що включають конденсатори, дроселі чи імпульсні трансформатори чи навіть повноцінні перетворювачі електричної енергії. Оскільки основна частина балансованої енергії не покидає контуру батареї, система має високу ефективність, хоча і вартість цієї системи більша. Отже, активне балансування доцільне в схемах високої потужності.

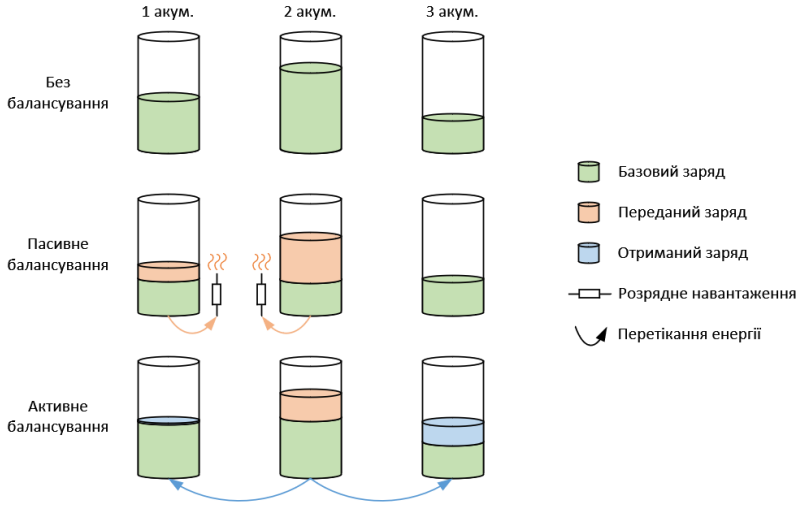


Рис. 2. Методи балансування

Усунення дисбалансу напруг, поряд з функціями захисту, є базовою вимогою для досягнення номінального терміну служби батареї [4]. Виконання цих алгоритмів забезпечить задовільний стан елементів та дозволить використовувати їх безпечно для людей і навколишнього середовища.

ПОСИЛАННЯ

1. Kudria S. O., Budko V. I. Introduction to Alternative and Renewable Energy. Electronic course of lectures. Kyiv: Natsionalnyi Tekhnichnyi Universytet Ukrainy KPI, 2013. 360 p. (Ukr)

2. Kertész N, Szabó L. Advances and Future Trends in Battery Management Systems. Engineering Proceedings. 2024; 79(1):66. https://doi.org/10.3390/engproc2024079066.

3. Hemavathi, S. Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology. Energy Storage. https://doi.org/10.1002/est2.203 (2021).

4. Z. B. Omariba, L. Zhang and D. Sun, "Review of battery cell balancing methodologies for optimizing battery pack performance in electric vehicles", IEEE Access, vol. 7, pp. 129335-129352, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2940090.

ПОРІВНЯННЯ ПЕРСПЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІТРОУСТАНОВОК ТА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УМОВАХ КИТАЮ ТА ІНДІЇ

В. М. Мамалига[1], О. В. Авраменко[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Навчально-науковий інститут атомної та теплової енергетики
вул. Політехнічна, 6, Київ, Україна, 02000,
тел.: (067) 905-59-60, e-mail: v.mamalyga@gmail.com
тел.: (095) 384-92-18, e-mail: avramenkoolegbusiness@gmail.com

У роботі представлено підходи щодо аналізу перспективності використання вітроустановок та сонячних електростанцій з урахуванням кліматичних, географічних та економічних факторів, що впливають на ефективність їх використання в умовах Китаю та Індії.

Ключові слова: *вітроустановки, сонячні електростанції, економічна ефективність, Китай, Індія.*

COMPARISON OF THE PROSPECTS OF USING WIND TURBINE AND SOLAR POWER PLANTS IN THE CONDITIONS OF CHINA AND INDIA

V. Mamalyga[1], O. Avramenko[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Prospect Beresteiskyi, 37, Kyiv, 03056 , Ukraine
phone: (067) 905-59-60, e-mail: v.mamalyga@gmail.com
phone: (095) 384-92-18, e-mail: avramenkoolegbusiness@gmail.com

The paper presents approaches to analyzing the prospects for the use of wind turbines and solar power plants, taking into account climatic, geographical and economic factors that affect the efficiency of their use in the conditions of China and India.

Keywords*: wind turbines, solar power plants, economic efficiency, China, India.*

ORCID: [1] 0000-0003-3650-2574; [2]0009-0003-7138-7898

Зміна кліматичних умов зумовлює необхідність переходу на відновлювані джерела енергії. Китай та Індія як найбільші за кількістю населення країни відіграють ключову роль у споживанні та виробництві ресурсів світової енергетики. Урбанізація, зростання промислового виробництва та підвищення рівня життя населення спричиняють зростання попиту на енергоресурси, що робить розвиток відновлюваної енергетики вкрай важливим. Китай є світовим лідером виробництва та використання вітроустановок. В Індії вітрова енергетика забезпечує значну частку електроенергії країни, а уряд Індії планує подальше розширення цієї галузі з метою зменшення залежності від вугілля. Китай також є не лише найбільшим світовим виробником, але й лідирує у встановленні сонячних панелей. Разом з тим Індія імплементує закони щодо розвитку виробництва та використання власних сонячних електростанцій. Отже, актуальним є аналіз економічної доцільності запровадження сонячних електростанцій у Китаї та Індії. Важливо також враховувати наявність митних обмежень для впровадження сонячних електростанцій іноземного виробництва для Індії. Під час проведення розрахунків річних обсягів виробництва електроенергії та витрат на обслуговування було проаналізовано ринок моделей вітрових установок та сонячних електростанцій. Було вибрано вітроустановку MF-50000 з урахуванням витрат на контролер, інвертор, батареї, башту та проводку, а також сонячну електростанцію Mono 580W TOPCon з урахуванням витрат на фотоелектричний комбайнер, контролер сонячної батареї, інвертор чистої синусоїди, батареї, опори для монтажу, кабелі та інше як для Китаю, так і для Індії. Задля отримання коректних результатів проведено аналіз погоди для Китаю та Індії, враховано тривалість функціонування впродовж доби, а також рівень тарифів на електроенергію. Визначено, що середня швидкість вітру в м. Шанхай (Китай) на висоті 10 м становить 5,07 м/с. Для башти вітроустановки висотою 25 м швидкість вітру дорівнюватиме 6,685 м/с, що впливає на потужність вітроустановки. Аналогічно для м. Мумбаї (Індія) середньорічна швидкість вітру становить 4,11 м/с, а для башти висотою 25 м середня швидкість вітру дорівнює 5,42 м/с.

Проаналізовано також інформацію щодо середньорічної потужності сонячного випромінювання для Шанхаю, що становить 1398,4 кВт·год/м^2, а кількість пікових сонячних годин дорівнює 1398,4 / 365 = 3,8 год, аналогічно для Мумбаї середньорічна потужність сонячного випромінення становить 2007,5 кВт·год/м^2, а кількість пікових сонячних годин – 5,5 год. Рівень тарифів на електроенергію в Китаї та Індії становить $0,076 та $0,075 за кіловат-годину відповідно.

Зазвичай застосовуються три варіанти визначення річних обсягів виробництва електроенергії на сонячних електростанціях.

Варіант № 1 [*1*]: $E = P \cdot T_{pyear} \cdot PR$,
де E — обсяги виробництва енергії (кВт·год) на рік;
P — потенційна електрична потужність сонячної електростанції (кВт);
T_{pyear} — кількість пікових світлових годин на рік (год),
PR — коефіцієнт продуктивності, постійний для втрат (діапазон від 0,5 до 0,9, за замовчуванням приймаємо 0,75).
Варіант № 2 [*2*]: $E = A \cdot r \cdot H \cdot PR \cdot n$,
де E — обсяги виробництва енергії (кВт·год) на рік;
A — загальна площа панелі (м²),
r — продуктивність сонячної панелі (відн. од.),
H — середньорічне сонячне випромінювання на панелях, що їх встановлено під нахилом (кВт·год/м²)
PR — коефіцієнт продуктивності, постійний для втрат (діапазон від 0,5 до 0,9, значення за замовчуванням – 0,75),
n — кількість сонячних панелей у системі (шт.).

Варіант № 3: Використання спеціалізованого інтернет-ресурсу [*3*].

Аналіз засвідчив достовірність усіх відомих методик розрахунків [*1*, *2, 3*]. Результати відрізнялися не більше, ніж на декілька відсотків.

Згідно з підходами до розроблення техніко-економічного обґрунтування, представленими в роботі автора [*4*], було запропоновано залежність для визначення дисконтованих витрат / доходів від реалізації проєкту. При цьому було враховано вартість обладнання, витрати на встановлення та обслуговування, потужність, тривалість роботи впродовж року, тарифи на електроенергію та вартість грошей.

У результаті з'ясували, що вітроустановка в Шанхаї (Китай) за 10 років експлуатації окупається для всіх випадків, коли вартість грошей становить 0,05 (5 % на рік), а для інших випадків окупність проєкту залежатиме від кількості робочих годин та вартості грошей. А от аналіз впровадження сонячної електростанції в Шанхаї (Китай) показав відсутність окупності для більшості випадків. А для терміну реалізації до 10 років окупність взагалі недосяжна. Окупності проєкту сонячної електростанції можна досягти лише для тривалості роботи впродовж 15 або 20 років і лише за умови, що вартість грошей не перевищує 6 %. Це робить реалізацію проєкту сонячної електростанції в регіоні Шанхаю вельми сумнівною.

Аналогічні розрахунки щодо встановлення вітроустановки в Мумбаї (Індія), показали що для більшості випадків за 10 років експлуатації вітроустановка не окупиться. Незначною є прибутковість запровадження вітрової електростанції для випадку її експлуатації впродовж 15 год роботи на добу. У разі експлуатації впродовж 20 год на добу окупність проєкту настає за вартості грошей до 12 % на рік, а для випадку роботи вітроустановки впродовж 24 год на добу окупності проєкту можна досягти за вартості грошей до 17 % на рік. Аналіз впровадження сонячної електростанції засвідчив відсутність окупності для більшості випадків. Втім, витрати відшкодовуються у разі, коли вартість грошей менше 7 % річних. Для випадків, коли тривалість функціонування сонячної електростанції становить 15 років, витрати на проєкт відшкодовуються, коли вартість грошей менше 12 % річних, а для проєктів тривалістю функціонування сонячної електростанції в 20 років економічно доцільними є випадки, коли вартість грошей менше 13 % річних. Проведено також додаткові розрахунки з урахуванням митних тарифів Індії, які показали, що в разі необхідності сплати митних тарифів витрати на реалізацію сонячних електростанцій у м. Мумбаї (Індія) не окуповуються для більшості випадків. Економічно доцільними є реалізація проєкту впродовж 15 років (вартість грошей менше 6 % річних) та 20 років (вартість грошей менше 8 % річних).

Представлені у роботі підходи можуть стати ефективним інструментом для інженерів та кінцевих споживачів, які розробляють оптимальне рішення для вибору вітрових і сонячних електростанцій для Індії та Китаю, теплопостачання своїх об'єктів, враховуючи економічні, технічні та екологічні аспекти.

ПОСИЛАННЯ

1. JACKERY The Ultimate Guide To Solar Panel Calculation. URL: https://www.jackery.com/blogs/knowledge/ultimate-guide-to-solar-panel-calculation (Accessed: 2025-03-09)
2. SAUR ENEDRGY International. How you can calculate the annual solar energy output of a photovoltaic system. URL: https://www.saurenergy.com/solar-energy-blog/here-is-how-you-can-calculate-the-annual-solar-energy-output-of-a-photovoltaic-system (Accessed: 2025-03-09)
3. GLOBAL SOLAR ATLAS. URL: https://globalsolaratlas.info/map (Accessed: 2025-03-09)
4. Feasibility study for the implementation of solar power plants in the USA. Volodymyr Mykhaylovych Mamalyga, Oleh Oleksandrovych Prytulenko Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal 2024; 27(1):67-80. DOI: https://doi.org/10.33223/epj/175238 ISSN 1429-6675

УДК 621.311.25

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ КОМБІНОВАНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З ВДЕ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

І. М. Буратинський

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (044) 294-67-01, e-mail: buratynskyi@ienergy.kiev.ua

Для проведення оцінки економічної ефективності роботи комбінованої електростанції, до складу якої входить вітрова, сонячна та газопоршнева установка із встановленою потужністю 4 МВт кожна, використано фактичну ціну купівлі-продажу електричної енергії на ринку «на добу наперед» в Україні у лютому 2025 року. Для оцінки доходу з ринку прийнято оптимальну торгівельну стратегію, за допомогою якої відпуск електричної енергії з резервної станції здійснюється лише при пікових цінах купівлі-продажу електричної енергії на ринку. За результатами розрахунків визначено, що будівництво комбінованої електростанції, на відміну від будівництва електростанцій за різними точками приєднання до електричних мереж, дозволяє знизити капітальні інвестиційні витрати на 5,1 %; знизити середньозважену собівартість виробництва електричної енергії протягом всього життєвого циклу на 31,7 %; знизити дисконтований термін окупності інвестицій на 23,1 %.

Ключові слова: *комбінована електростанція, вітрова електростанція, сонячна електростанція, газопоршнева установка, економічна ефективність, ринок електричної енергії.*

DETERMINATION OF THE ECONOMIC EFFICIENCY OF THE OPERATION OF A COMBINED POWER PLANT WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES ON THE ELECTRICITY MARKET

I. Buratynskyi

General Energy Institute of NAS of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (044) 294-67-01, e-mail: buratynskyi@ienergy.kiev.ua

To assess the economic efficiency of a combined power plant consisting of a wind, solar and gas-piston plant with an installed capacity of 4 MW each, the actual purchase and sale price of electricity on the "day-ahead market" in Ukraine for February 2025 was used. To assess the income from the market, an optimal trading strategy was adopted, under which the sale of electricity from the reserve station is carried out only at peak prices for purchase and sale of electricity on the market. According to the results of the calculations, it was determined that the construction of a combined power plant, in contrast to the construction of power plants at different points of connection to the electrical grids, allows reducing capital investment costs by 5,1%, reducing the levelized cost of energy by 31,7%, reducing the discounted payback period of investments by 23,1%.

Key words: *combined cycle power plant, wind power plant, solar power plant, gas piston plant, economic efficiency, electricity market.*

ORCID: 0000-0003-2928-9621

Прийняття Закону України «Про внесення змін до деяких законів України у сферах енергетики і теплопостачання щодо удосконалення окремих положень, пов'язаних із веденням господарської діяльності та дією воєнного стану в Україні» від 14.01.2025 № 4213-IX, яким внесено зміни до Закону України «Про ринок електричної енергії» [1] (далі – Закон), зокрема, створило передумови до розвитку комбінованих електростанцій на ринку електричної енергії в Україні. Так, згідно з Законом надано право встановлювати на одній електростанції, що має одну точку приєднання до електричних мереж, електроустановки, призначені для виробництва електричної енергії на різних джерелах первинної енергії. При цьому сумарна встановлена потужність генерувальних установок може перевищувати потужність приєднання до електричних мереж, що дозволена згідно з технічними умовами на приєднання до електричних мереж. Однак сумарна фактична потужність відпуску електричної енергії в мережу не може перевищувати дозволену потужність приєднання до електричних мереж.

Можливість будівництва електростанцій різного типу з їх приєднанням до електричних мереж в одній точці, дозволяє виробникам електричної енергії, на таких комбінованих електростанціях, при збереженні аналогічної встановленої потужності зменшити капітальні інвестиційні витрати, особливо в частині економії витрат на приєднання до електричних мереж – будівництво ліній електропередачі меншої пропускної спроможності, реконструкцію електричних підстанцій менших обсягів тощо.

Слід зазначити, що будівництво комбінованої електростанції з об'єднанням декількох генерувальних установок різного типу на одній площадц, дозволяє підвищити економічну ефективність функціонування таких електростанцій на ринку електричної енергії за рахунок підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності (далі – КВВП), що особливо є актуальним для електростанцій, які виробляють електричну енергію з відновлюваних джерел енергії, зокрема сонячних (далі – СЕС) та вітрових електростанцій (далі – ВЕС), які характеризуються низьким рівнем КВВП та залежністю обсягів виробництва електричної енергії від погодних факторів.

Метою цієї роботи є оцінка економічної ефективності роботи комбінованої електростанції, а саме в частині визначення капітальних інвестиційних витрат, середньозваженої собівартості виробництва електричної енергії протягом всього життєвого циклу й дисконтованого терміну окупності інвестицій, та порівняння отриманих показників з аналогічними електростанціями, які мають, однак, різні точки приєднання до електричних мереж.

Для проведення дослідження прийнято комбіновану електростанцію, до структури якої входять ВЕС, СЕС, та газотурбінна установка (далі – ГТУ). Для прогнозування обсягів виробництва електричної енергії на джерелах негарантованої потужності (ВЕС, СЕС) як загальноприйнятий підхід [2] використано статистичні дані щодо фактичних обсягів виробництва електричної енергії в ОЕС України за 2020 рік, із КВВП для ВЕС на рівні 33,1 %; для СЕС – 16,2 %; для РЕС – 30 %. Для оцінки доходу від продажу електричної енергії на ринку прийнято фактичні погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії на ринку «на добу наперед» в Україні за фактичними даними лютого 2025 року [3]. Для ВЕС вартість відпуску електричної енергії прийнято на рівні середньоарифметичного значення протягом доби на рівні – 5 873 грн/МВт·год; для СЕС відпуск електричної енергії та відповідно продаж електричної енергії згідно з типовим профілем сонячної інсоляції – 5 079 грн/МВт·год; для РЕС при пікових цінах купівлі-продажу електричної енергії на ринку (у вечірній пік навантаження в енергосистемі) – 8 295 грн/МВт·год.

Розрахована середньозважена вартість капіталу (WACC) становить 12,8 % виходячи з поточної облікової ставки НБУ на рівні 15,5 %. Питомі капітальні інвестиційні витрати для ВЕС прийнято на рівні 1300 $/кВт; для СЕС на обладнання постійного струму – 500 $/кВт та на обладнання змінного струму – 200 $/кВт; для РЕС – 700 $/кВт. Для всіх типів електростанцій прийнято частку витрат на будівництво, що становить 14 % капітальних витрат на обладнання змінного струму. Вартість приєднання до електричних мереж для всіх типів електростанцій – 91,2 $/кВт. Питомі витрати на обслуговування для ВЕС – 25 $/кВт-рік; для СЕС на обладнання постійного струму – 7 $/кВт та на обладнання змінного струму – 12 $/кВт-рік; для РЕС – 12 $/кВт-рік; паливна складова для РЕС – 86,9 $/МВт·год виходячи з поточної пільгової ціни постачання природного газу, згідно з постановою КМУ від 6.03.2022 № 222, та ефективності роботи ГТУ на рівні 43 %.

За результатами розрахунків визначено, що будівництво комбінованої електростанції, на відміну від електростанцій, розташованих на різних площадках, дозволяє зменшити вартість приєднання до електричних мереж майже втри рази, та відповідно знизити капітальні інвестиційні витрати на 5,1 %; знизити середньозважену собівартість виробництва електричної енергії протягом всього життєвого циклу на 31,7 % із середньозваженого значення відносно обсягів виробництва електричної енергії по всіх електростанціях на рівні 100,7 €/МВт·год до 68,8 €/МВт·год; знизити дисконтований термін окупності інвестицій на 23,1 % з 4,9 до 3,7 років.

ПОСИЛАННЯ

1. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 09.03.2025).
2. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія / М. П. Кузнєцов. — Київ: ІВЕ, 2022. 142 с. ISBN 978-966-641-11.
3. АТ «Оператор ринку». Погодинні ціни купівлі-продажу електроенергії. URL: https://www.oree.com.ua/index.php/pricectr (дата звернення: 10.03.2025).

UDK 621.313.322

INFLUENCE OF CONTROL OF SYNCHRONOUS GENERATOR COOLING ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE STATOR WINDING

K. A. Kuchynskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteiskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (067) 991-23-18, e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

The distribution of thermomechanical displacements and stresses in the insulation elements of the stator winding of a synchronous generator under nominal conditions of cooling the rod and taking into account its regulation in the operating mode of the machine with a variable load has been numerically studied.

Keywords: *generator, stator-winding rod, insulation, controllable cooling, thermomechanical loads.*

ВПЛИВ РЕГУЛЮВАННЯ ОХОЛОДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА НА МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМОТКИ СТАТОРА

К. А. Кучинський

Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (067) 991-23-18, e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com

Чисельно досліджено розподіл термомеханічних переміщень та напружень в елементах ізоляції обмотки статора синхронного генератора за номінальних умов охолодження стержня та з урахуванням його регулювання у режимі роботи машини зі змінним навантаженням.

Ключові слова: *генератор, стержень обмотки статора, ізоляція, регулювання охолодження, термомеханічні навантаження.*

ORCID: 0000-0003-4003-6721.

The amount of basic equipment of power plants in Ukraine with a service life of 40 years or more is already more than 85 %. There is intense wear and tear on the main equipment and a decrease in its reliability. Since its mass replacement is not expected in the near future, the main ways to maintain reliability at an acceptable level are modernization and load reduction to reduce the level of negative operating impacts on equipment elements. An analysis of damage to electric generators in various countries has shown that the main causes of failures with the longest recovery time are damage to the stator and rotor windings. However, upgrading the winding requires its removal and is a technologically complex, expensive and time-consuming undertaking. It is known that one of the most negative factors affecting the insulation of the stator winding and its fastening elements are thermomechanical movements and stresses.

Among mechanical effects, insulation stresses caused by periodic heating and cooling cycles of the winding are the most dangerous and can lead to breakdown. Almost the only opportunity to somehow influence the operating conditions of the winding is to regulate the temperature of the cooling gas at the inlet to the rod by changing the flow rate or temperature of the cooling water in the gas cooler of the machine. In this work, using a mathematical model of the stator-winding rod of a synchronous generator with gas cooling, the possibility of reducing the range of changes in its temperature and thermomechanical stresses with a decrease in load is investigated.

The dependence of the temperature of the cooling gas at the entrance to the stator winding on the current load, subject to which its average temperature remains at the level of the nominal mode, has the form:

$$T_1 = T_0 + \Delta T_N \cdot (1 - I^2), \tag{1}$$

where T_1 is the gas temperature at the inlet to the stator winding, °C; T_0 – cold gas temperature, °C; ΔT_N – excess of the average temperature of the stator winding above the cold gas; I – current in the stator winding, *p.u.*: $I = I_1/I_N$ (I_1 – current in the stator winding in the current mode, A; I_N – nominal current, A).

Operating experience and mechanical calculations show that the point where the winding bars exit the core is the most dangerous from the point of view of insulation strength. Based on the results of thermal calculations and under the assumption that the winding can move freely in the axial direction, the displacement of the rod relative to the end of the stator core due to thermal elongation is estimated.

The change in the average temperature of the stator winding is calculated and the thermomechanical stresses in the insulation of the slot part of the winding are estimated when the active load of the generator is reduced from the nominal value to no-load at a speed of 4 MW/min for 50 min with normal cooling and when the temperature of the cold gas at the winding inlet is regulated.

The thermomechanical state of the insulation of the stator-winding rod of a synchronous generator was studied using the numerical finite element method (FEM) [1].

Using FEM, finding the displacement field is associated with minimizing the potential energy of an elastic body. After determining the nodal values of the movements vector, the components of deformations and stresses in the elements are calculated taking into account the corresponding initial and boundary conditions.

At the first stage, a numerical thermomechanical calculation of half of the stator core (from the middle to the end zone) in the axial section was preliminary carried out. The obtained values of movements of the stator nodes along the *x* and *y*-axes for each moment of time were specified as boundary conditions of the first kind to the nodes of the rod model, in which the frontal parts were «knitted» with bandages.

The cold gas temperature at the winding inlet was taken to be 40 °C. At the same time, the change in the temperature of the stator winding during load shedding without regulating the temperature of the cold gas was 30 °C (from 73 to 43 °C), the temperature of the stator core decreased on average from 66 to 60 °C. The insulation temperature in the groove part of the rod was taken to be equal to the average between the temperature of the winding and the iron of the stator core.

The axial components of the displacements reached, at the rated load, an average of 0.29 mm in the groove part, 0.69 mm in the **"**free" zone at the exit of the rod from the groove and 0.71 mm in the end part near the winding fastenings with bandages, and the radial components – (-0.17) mm in the **"**free" zone. In this case, the stress values in the insulation elements were axial (-8) MPa in the groove part, (-36) MPa at the point where the winding exits the groove and (-24) MPa in the middle of the end part; radial, respectively (-33; -86; -43) MPa. At the no-load point, the axial movements decreased to 0.206 mm in the groove part, 0.451 mm in the **"**free" zone and 0.493 mm in the end part of the winding, radial (-0.029) mm at the exit from the groove. Accordingly, the axial stresses in the insulation changed to 4.1 MPa in the groove part, 8.1 MPa at the point where the winding exits the groove (and their values changed sign, i.e. these sections of the rod began to be subject to tensile forces due to the corresponding heating of the core) and (-2.5) MPa in the middle of the end part; the radial values assumed the same character of change 2.2; 9.6; -4.5 MPa. Thus, the stresses along the *x*-axis in the nominal mode do not exceed the permissible values for insulation according to the conditions of its mechanical strength (80...90 MPa), and along the *y*-axis at individual points at the exit from the groove they are close to the maximum permissible. At the idle point, their values decrease by an order of magnitude.

Studies of thermomechanical displacements and stresses in the insulation when regulating the temperature of the cold gas at the entrance to the winding and reducing the active load of the machine from the nominal value to idle speed at a speed of 4 MW/min showed that the temperature of the winding no longer undergoes significant sudden changes during the entire process and remains almost constant at 73...72 °C. The stator temperature increases slightly (from 66 to 70 °C). At the same time, at the moment the load begins to be reduced, the values of movements and stresses in the insulation coincide with the values in the nominal mode of the unregulated process in terms of gas temperature, and at the end of the load shedding, the movements are equal, respectively, along the *x* axis on average 0.33 mm in the groove part, 0.77 mm at the exit of the rod from the groove and 0.8 mm in the end part near the winding fastenings; along the *y*-axis (-0.16) mm at the exit of the rod from the groove. The stresses in the insulation decrease in absolute value along the *x*-axis to values of (-6.3) MPa in the groove part, (-31.5) MPa at the point where the winding exits the groove and (-23.2) MPa in the middle of the end part, and along the *y*-axis, respectively (-30.8; -78.3; -42.1) MPa, and without changing the sign.

Calculation studies indicate a decrease in the absolute values of thermomechanical stresses in the insulation when regulating the temperature of the cold gas at the entrance to the winding. The convergence of the rates of temperature expansion of the core and the stator winding makes it possible to reduce both the average and maximum thermomechanical stresses in the insulation or, what is the same, a decrease in the mutual axial movements of the core and the winding rod leads to lower absolute values of stress.

Control of winding cooling can be achieved by installing an adjustable damper on the cold-water supply pipeline to the machine's gas cooler or by using an adjustable electric drive on the pump supplying this water. Great accuracy of regulation of this object is not required.

The next step in this direction should be the development of a control system and testing it on a specific generator during operation.

REFERENCES

1. Kuchynskyi K.A. Thermal and thermomechanical processes in turbogenerators. Kyiv, TOV Pro Format Publ., 2020. 239 p. (Rus).

УДК 621.311

ІНОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПОБУДОВИ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ

Ю. М. Лаврич[1], С. В. Плаксін[2], Ю. В. Шкіль[3]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (050) 905-51-95,e-mail: lavrich@westa-inter.com

У роботі розглядається компромісний спосіб підвищення ефективності використання енергії сонячного випромінювання, що ґрунтується на застосуванні аеростатного розміщення сонячних електростанцій.

Ключові слова: *сонячні панелі, аеростат, енергія*

INNOVATIVE TECHNOLOGIES FOR CONSTRUCTION OF THE ENERGY SYSTEM

Yu. Lavrich[1], S. Plaksin[2], Yu. Shkil[3]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5, St. Pysarzheskoho., Dnipro,Ukraine, 49005
phone: (050) 905-51-95. lavrich@westa-inter.com

The paper considers a compromise method for increasing the efficiency of solar radiation energy use, based on the use of aerostatic placement of solar power plants.

Keywords: *solar panels, balloon, energy*

ORCID: [1]0000-0003-3616-2135; [2]0000-0001-8302-0186; [3]0000–000 –8684-5906

Сучасні тенденції розвитку електроенергетичних систем пов’язані з широкомасштабним використанням відновлюваних джерел енергії. Попри величезну кількість сонячної енергії, що надходить на поверхню Землі, її використання для великомасштабного отримання енергії пов’язане з суттєвими проблемами.

Зазвичай вони обумовлені такими природними факторами, як низька щільність сонячної радіації на поверхні Землі, переривчастий характер її надходження тощо. Розмір площі, потрібної для розміщення сонячної електростанції (СЕС), – один з важливих параметрів, і саме питання, пов’язане з розміром площі, необхідної для розміщення СЕС, сьогодні стало важко вирішуваним для багатьох країн. Зберігаючи принцип отримання енергії, вирішення проблем наземних СЕС, можливим шляхом є застосування сонячних космічних СЕС.

Космічний напрям має велике фундаментальне опрацювання теорії отримання енергії, але досі не знайдено оптимальних рішень практичної реалізації сонячних космічних електростанцій (СКЕС). Ефективності системи СКЕС можна досягти за умови, що випромінювана зі СКЕС на Землю потужність становитиме 5–10 ГВт. На жаль, такі станції можуть бути побудовані тільки в майбутньому, оскільки для станції потужністю 10 ГВт площа сонячних батарей становить б–50 км^2 при масі 10 тис. т.

Тому актуальним науково-практичним завданням у сучасних умовах є пошук нового способу використання сонячної енергії, що має практичну реалізацію забезпечення ефективності використання сонячної енергії.

З урахуванням існуючих проблем наземних СЕС, а надто космічних СКЕС, компромісним варіантом вирішення проблем може бути застосування аеростатного способу розміщення СЕС.

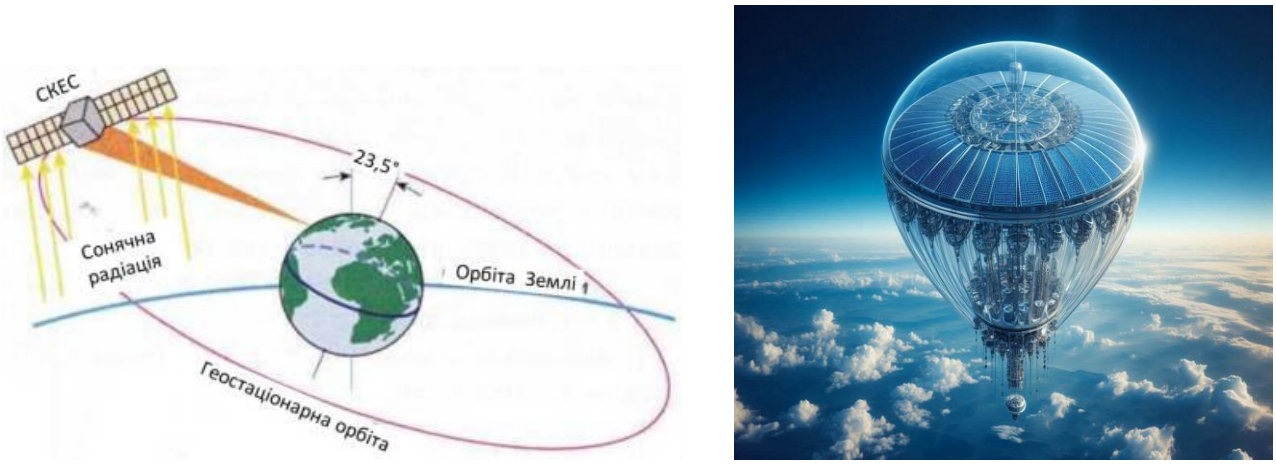
На рис. 1 показаний спосіб космічного (а) та аеростатного (б) розміщення СЕС.

Спосіб справді компромісний, оскільки, усуваючи проблеми наземних СЕС, реалізує вищий рівень використання сонячної енергії, забезпечує ефективні техніко-економічні характеристики всього життєвого циклу АСЕС. Перспективу у вирішенні проблем наземних СЕС все більше пов’язують із застосуванням повітроплавних платформи для розміщення СЕС, насамперед прив’язних аеростатів.

На рис. 1 наочно показано різницю двох технологій побудови СЕС, уникнення численних запусків дорогих (навіть тих, що повертаються) космічних носіїв для побудови в космосі СКЕС, а технологія практичної побудови аеростатної системи АСЕС повністю реалізується безпосередньо на Землі. Аеростатні СЕС найенергоефективніші електростанції, які здатні збирати до 97 % сонячної енергії, при цьому цей тип споруд потребує невеликих територій поверхні, оскільки розташоване на поверхні Землі обладнання займає дуже мало місця, а громіздкий балон аеростата з фотоелектричним шаром, розташовується в повітрі.

Повітряні платформи мають об’ємну несучу систему, піднімальна сила якої зростає пропорційно кубу лінійних розмірів, можуть переносити вантаж масою до декількох десятків тонн [1].

Аеростатні СЕС можуть працювати над поверхнею Землі або моря на висоті від декількох десятків метрів до декількох кілометрів. Прив'язана АСЕС складається з повітряного та наземного фрагментів, з'єднаних між собою кабель-канатом. Основний елемент АСЕС – повітроплавна платформа, яка може бути виведена на різні висоти над поверхнею Землі, вище хмар, що забезпечить безперервне використання сонячної енергії протягом дня. Форма та розміри повітроплавної платформи можуть бути різного типу (дископодібна, куляста та ін.) поверхні розміщення сонячних елементів, що залежить від застосованої технології вибраних сонячних елементів (моно, гнучка), потужності СЕС тощо.



а б

Рис. 1. Космічний (а) та аеростатний (б) способи розміщення СЕС

Сучасна пілотована платформа розміщення АСЕС є багатошаровою оболонкою з синтетичних тканин типу дакрон, мілар і тедлар з просоченням полімерним сполучним матеріалом, яка заповнюється газом типу гелій (He), водень (H_2). Платформа розміщення повинна мати систему автоматичного контролю та управління положенням та орієнтацією АСЕС, тиску всередині оболонки залежно від атмосферного тиску та температури повітря. Для стабілізації повітряного фрагмента АСЕС використовується пілотована платформа, яка гіростабілізується, і оперення, яке наповнюється атмосферним повітрям.

Повітряний фрагмент АСЕС повинен забезпечити безлюдну технологію, реалізуючи програмне управління СЕС відповідно до автоматичного алгоритму, а автоматизована система має бути достатньо інтелектуальною, щоб працювати з типовими профілями генерації СЕС.

Сучасні технології та перспективна схемотехніка дозволяють реалізувати повний автоматичний режим наземного та повітряного фрагментів АСЕС.

Для користі оперативного рішення задач енергозабезпечення та створення потрібних локальних зон енергозабезпечення, АСЕС повинен бути мобільним комплексом, що легко перевозиться і розвертається з похідного в робоче положення.

Виконання цих вимог потребує використання гібридного типу повітряної платформи розміщення СЕС.

СЕС та радіоелектронне обладнання АСЕС повинні бути захищені від дії зовнішніх факторів у спеціальному аеродинамічному пристрої. Виконання цільових функцій наземним фрагментом АСЕС може бути реалізоване використанням малої кількості простих конструктивних елементів: щогли для причалювання, поворотної платформи, аеростатної лебідки, газобалонного обладнання, автомобільного причепу тощо.

Попередній аналіз свідчить про те, що більшість потрібних конструктивних елементів можуть бути вітчизняного виробництва, включно з радіоелектронним обладнанням АСЕС.

Основним елементом АСЕС є сонячний елемент, який є покупним, але проєктування сучасних складних технічних систем передбачає використання елементів не вітчизняного виробництва.

Створення вітчизняного сонячного елемента і пілотованої платформи розміщення АСЕС можливе лише після техніко-економічного аналізу доцільності власного виробництва.

В Україні накопичено науково-технічний заділ, що дозволяє використовувати існуючі технології для створення технологій аеростатного розміщення сонячних елементів, застосування яких забезпечить підвищення ефективності використання сонячної енергії та прилучитися до країн, які вже мають системи АСЕС.

ПОСИЛАННЯ

1.Бєляєв Д. М., Расстригін О. О., Семенюк Р. П., Бунаков В. П. Аналіз світового досвіду застосування військових аеростатних літальних апаратів та перспективи їх використання у Збройних Силах України. Озброєння та військова техніка. 2015. № 3. С. 67–72.

УДК 66.047.59, 664.8.047

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНА СУШИЛЬНА УСТАНОВКА З ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

В. М. Пазюк[1], К. М. Самойленко[2], С. О. Бірюков[3]

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. М.Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (096) 223-53-06, e-mail: vadim_pazuk@ukr.net

Проведені дослідження з визначення енергетичних характеристик сушильної установки з тепловим насосом при низькотемпературному сушінні насіннєвого матеріалу.

Ключові слова: *енергоефективність, сушильна установка, тепловий насос, схожість, насіння ріпаку.*

ENERGY-EFFICIENT DRYING UNIT WITH HEAT PUMP

V. Paziuk[1], K. Samoilenko[2] S. Biriukov[3]

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine,
2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine,
(096) 223-53-06, e-mail: vadim_pazuk@ukr.net

Research on determining the energy characteristics of a drying unit with a heat pump for low-temperature drying of seed material was investigated.

Keywords: *energy efficiency, drying unit, heat pump, germination, rapeseed.*

ORCID: [1]0000-0002-4955-1941; [2]0000-0002-5169-4466.

Технології сушіння зерна набули значного розвитку у світі [1, 2]. Постійно проводиться вдосконалення конструкцій установок і технологій, що пов'язані між собою і спрямовані на зменшення часу сушіння, підвищення енергоефективності сушарок та збереження якості насіннєвого матеріалу [3].

Передові енергоефективні низькотемпературні технології сушіння насіннєвих матеріалів реалізується через застосування теплового насоса в сушильній установці. Ця технологія сушіння має такі переваги:

- економічність: використання теплової енергії довкілля (повітря) й перетворення енергії низькопотенційних джерел на придатну для використання енергію;
- екологічність: під час роботи тепловий насос не викидає шкідливих речовин;
- технологічність: можна використовувати як для нагрівання, так і для охолодження або сумісної одночасної дії системи нагрівання та охолодження;
- експлуатаційна доцільність: низькі сервісні витрати й тривалий строк служби.

Для дослідження енергетичних характеристик була виготовлена сушильна установка з тепловим насосом (ТН), яка складається з теплонасосного агрегату 1, шахти 5 та контрольно-вимірювальних приладів і систем автоматики: регулятора швидкості 6, лічильника електроенергії 7, напільних терезів 8 з цифровим табло 11 (рис. 1).

Під час вибору режимів сушіння в сушильній установці з ТН використовувались дані експериментальних досліджень на конвективному сушильному стенді та результати лабораторних досліджень з якості насіння ріпаку [4].

Оптимальні параметри при сушінні насіння ріпаку з ТН з розробленою сушильною шахтою (завантаження 17 кг насіння ріпаку): температура теплоносія (конденсації) t = 50 °С, швидкість руху теплоносія на виході з зерносушарки V = 1,2 м/с, початкова вологість насіння $W_п$ = 19,2 %, товщина шару матеріалу 20 мм. Наступним параметром для дослідження інтенсивності сушіння є початкова вологість насіння ріпаку.

Технічна характеристика сушильної установки з парокомпресійним тепловим насосом:

1. Продуктивність по вилученій волозі	2 кг/год
2. Температура теплоносія на вході в сушильну камеру	35÷55 °С
4. Температура випаровування холодоагенту	0÷+5 °С
5. Холодоагент	R34

6. Вологовміст теплоносія в сушильній установці	6÷8 г/кг с.п.
7. Витрати теплоносія	250÷800 м^3/год
8. Компресор ZR49K3E – TFD:	
потужність електродвигуна (холодопродуктивність)	4,08 (11,21) кВт
9. Циркуляційний вентилятор Ц14-46 № 2,5	
потужність електродвигуна	0,75 кВт

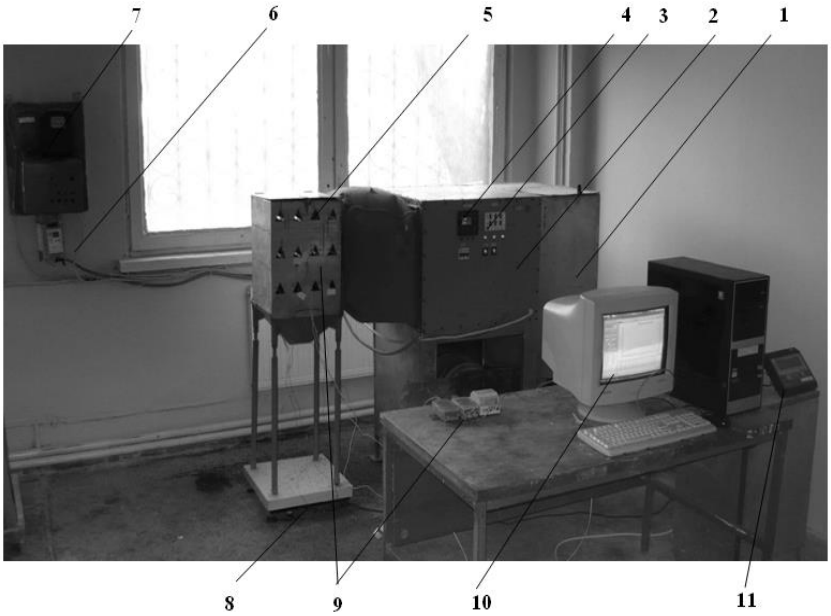


Рис. 1. Сушильна установка з ТН для сушіння насіннєвих культур:

1 – теплонасосний агрегат; 2 – щит керування; 3 – реле часу; 4 – термореле; 5 – сушильна шахта; 6 – регулятор швидкості; 7 – лічильник електроенергії; 8 – терези; 9 – аналоговий цифровий перетворювач і-7018, конвертор-інтерфейс і-7520 та хромель-копелеві термоелектричні перетворювачі; 10 комп'ютер; 11 – цифрове табло терезів

За результатами досліджень, питомі витрати теплоти при сушінні насіння ріпаку від початкової вологості 19,2 % до кінцевої вологості 8 % становлять 4480 кДж/кг вип. вологи або 467 кДж/кг сухого продукту [5].

Проводячи порівняння питомих витрат теплоти при сушінні насіння ріпаку в сушильній установці з тепловим насосом та в сушильній установці з електричним нагрівачем (що були додатково встановлені) визначено, що тепловий насос у порівнянні зі звичайним нагрівом теплоносія в калорифері дозволяє зменшити споживання енергії в 3,281 раза, що і є практично визначеним коефіцієнтом перетворення ТН (рис. 2, 3).

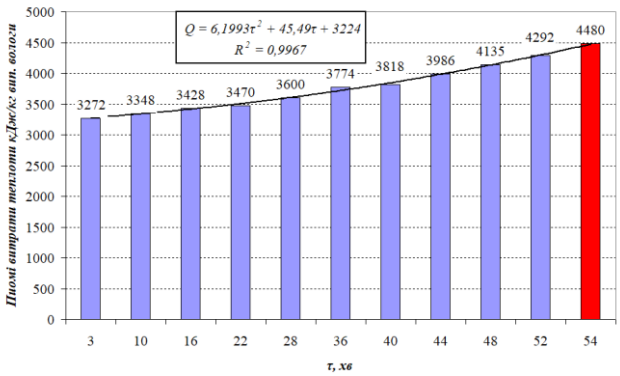


Рис. 2. Питомі витрати теплоти від вологості матеріалу в сушильній установці з ТН:
t = 50 ºС, V = 1,2 м/с, Wп = 19,2 %, δ = 20 мм,
d = 6 г/кг с. п., μ_m = 3,2

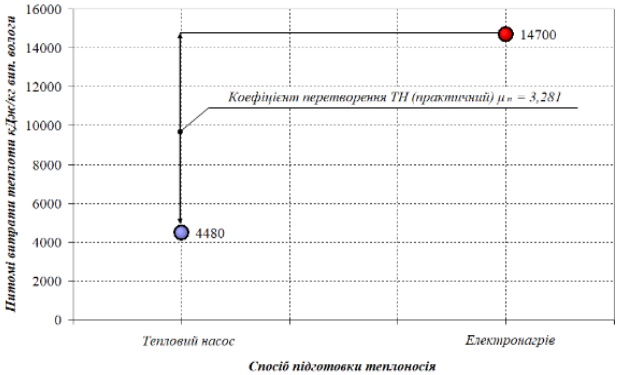


Рис. 3. Порівняння питомих витрат теплоти залежно від способу підготовки теплоносія

Оцінка якості сушарки оцінюється за її енергетичним коефіцієнтом корисної дії η (к.к.д.), який визначається співвідношенням корисної енергії *Q кор* до всієї витраченої на процес *Q витр:*

$$\eta = \frac{Q_{\text{кор}}}{Q_{\text{витр}}} \quad (1)$$

якщо розрахунок вести на кілограм випареної вологи, то формула має такий вигляд:

$$\eta = \frac{r}{Q_{\text{калор}}} \quad (2)$$

де: *r* – питома теплота випаровування вологи, кДж/кг.

Q калор – витрачена енергія на нагрівання теплоносія в калорифері, кДж/кг вип. вологи.

Використовуючи формулу 4, розраховуємо к.к.д. сушильної установки з тепловим насосом:

$$\eta = \frac{r}{Q_{калор}} = \frac{2382}{4480} = 53{,}2\% \quad (3)$$

З наведеного розрахунку в формулі 3, к.к.д. сушильної установки з ТН становить η = 53,2 %, а при електронагріві η = 16,2 %.

Схожість насіння ріпаку в сушильній установці з ТН по відношенню до вихідного ріпаку становить 100 %, що свідчить про високу якість процесу сушіння (табл. 1). Енергія пророщування на 2–4-й день змінюється від вихідної на 1 %.

Таблиця 1. Вплив параметрів процесу на якість насіння ріпаку при сушінні в сушарці з ТН

№	Параметри процесу				Параметри якості		
	Температура теплоносія *t*, ºС	Швидкість руху *V*, м/с	Товщина шару *δ*, мм	Початкова вологість насіння *W*, %	Енергія пророщування *E*, %		Схожість на 7-й день пророщування *C*, %
					2-й день	4-й день	абс./відн.
1.	Вихідний ріпак				83	85	89/100
2.	50	1,2	20	19,2	82	84	89/100

Схожість насіння ріпаку залежить від способу підготовки теплоносія; так, при температурі 50 °С в сушарці з ТН схожість становить 100 %, а при електричному нагріві, за дослідженнями на конвективному сушильному стенді, – 97 % [5]. Тобто втрачається 3 % насіннєвого матеріалу, що допустимо за вимогами до насіннєвого ріпаку.

В Інституті технічної теплофізики НАН України також проведені дослідження на різних насіннєвих матеріалах і встановлені раціональні режими сушіння з високою схожістю [6–11].

Отже, застосування передових енергоефективних низькотемпературних технологій при дослідженні сушіння насіннєвих матеріалів дало такі результати:

1. Підвищення інтенсивності сушіння насіння досягається за рахунок зниження вологовмісту теплоносія. Поставлене завдання вирішується за рахунок розробки сушильної установки з тепловим насосом при низькотемпературному сушінні 50 °С та вологовмісту теплоносія 6 г/кг с.п. з підвищенням інтенсивності процесу на 13 %.

2. Енергоефективність установки визначається питомими витратами, які становлять 4480 кДж/кг вип. вологи (при зниженні вологості ріпаку від 19,2 до 8 %), к.к.д сушильної установки з тепловим насосом – 58,4 %.

3. Схожість зерна після сушіння в установці з тепловим насосом становить 90–100 %, що дозволяє рекомендувати цю установку з ТН для сушіння насіннєвого матеріалу.

4. Внаслідок проведених досліджень встановлено, що при застосуванні сушильної установки з ТН замість сушильної установки з електропідігрівом електрокалориферами якість насіння ріпаку покращилось на 3 %, питомі витрати теплоти знизились в 3,281 раза, к.к.д. сушильної установки з тепловим насосом збільшилось до 58,4 %.

ПОСИЛАННЯ

1. Franca Neto J. B., Henning A. A., Krzyzanowski F. C. Soybean seed drying. Seed production and technology for the tropics. In: EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. Tropical soybean: improvement and production. Rome: FAO, 1994. P. 217–240.

2. Krzyzanowski F. C., West S. H., Franca Neto J.B. Drying soybean seed using air ambient temperature at low relative humidity. Revista Brasileira de Sementes. 2006. Vol. 28, No. 2. P. 77–83.

3. Broker D. B., Bakker-Arkema F. W., Hall C. W. Drying cereal grains. Westport: AVI. 1974. 265 p.

4. Paziuk, V. M., Petrova, Z. O., Tokarchuk, O. A., Yaropud, V. M. Research of rational modes of drying rape seed. INMATEH Agricultural Engineering. 2019. 58(2). P. 303–310.

5. Пазюк В. М. Теплонасосні сушильні установки в процесах сушіння зерна. Всеукраїнський науково-технічний журнал “Техніка, енергетика, транспорт агропромислового комплексу”. 2016. № 2(94). С. 53–57.

6. Pazyuk V. Petrova Zn., Chepeliuk O. Determination of rational modes of pumpkin seeds drying. *Ukrainian Food Journal*. 2018. Volume 7. Issue 1. P. 135–150.

7. Paziuk V. M., Liubin M. V., Yaropud V. M., Tokarchuk O. A., Tokarchuk D. M. Research on the rational regimes of wheat seeds drying. *INMATE. Agricultural Engineering.* 2018. Volume 56. No. 3. P. 39 – 48

8. Snezhkin Yu.F., Paziuk V.M., Petrova Zh. O., Tokarchuk O.A. Determination of the energy efficient modes for barley seeds drying. *INMATEH - Agricultural Engineering*. 2020. Volume 61. No. 2. P. 183–192.

9. Paziuk V., Vyshnevskiy V., Tokarchuk O., Kupchuk I. Substation of the energy efficient schedules of drying grain seeds. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov Series II: Forestry • Wood Industry • Agricultural Food Engineering •* Vol. 14(63) No. 2. 2021. P. 137–146.

10. Paziuk V., Petrova Zh., Tokarchuk O., Polievoda Yu. Special aspects of soybean drying with high seedling vigor. *University.Pjlstehnica of Buharest Scientific Bulletin, Series D.* Vol. 83. Iss. 2. 2021. P. 327–336.

11. Paziuk V., Snezhkin Y., Dmytrenko N., Ivanov S., Tokarchuk O., Kupchuk I. Thermal and physical properties and heat-mass transfer processes of drying pumpkin seeds. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY.* № 7. 2022. P. 154–157.

УДК 620.9:621.1:621.31

ДВИГУН СТІРЛІНГА ЯК ЕЛЕМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Є. С. Нікітін[1], В. М. Павленко[2]

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03141, Україна,
тел.: (099) 104-09-40, e-mail: noik60@gmail.com

У роботі планується досліджувати використання двигунів Стірлінга в локальних енергосистемах, їхню ефективність, гнучкість у виборі палива та можливість інтеграції з відновлюваними джерелами енергії.

Ключові слова: *двигун Стірлінга, локальні системи енергопостачання, мікро-ТЕЦ, енергоефективність.*

STIRLING ENGINE AS AN ELEMENT FOR INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF LOCAL POWER SUPPLY SYSTEMS

Y. Nikitin[1], V. Pavlenko[2]

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Heroiv Oborony St, 15, Kyiv, 03041
phone: (099) 104-09-40, e-mail: noik60@gmail.com

The work plans to investigate the use of Stirling engines in local power systems, their efficiency, flexibility in fuel selection, and the possibility of integration with renewable energy sources.

Key words: *Stirling engine, local energy supply systems, micro-CHP, energy efficiency.*

ORCID: [1] 0009-0003-4000-3193; [2] 0000-0003-2163-8508.

Сучасні енергетичні системи стикаються з викликами підвищення ефективності та забезпечення сталої генерації електроенергії у контексті екологічних обмежень. Двигун Стірлінга є перспективною технологією для локальних систем енергопостачання, що забезпечує високу ефективність перетворення теплової енергії на механічну та електричну. Завдяки можливості роботи на різних теплових джерелах, зокрема на біомасі, промислових відходах тепла та концентрованій сонячній енергії, ця технологія відіграє важливу роль у розвитку автономних систем мікро-ТЕЦ. Зокрема, в умовах переходу до низьковуглецевої економіки двигуни Стірлінга можуть стати ключовим компонентом децентралізованого енергопостачання.

Історично двигун Стірлінга був розроблений Робертом Стірлінгом у 1816 році як альтернатива паровим машинам. Його принцип роботи базується на зовнішньому згорянні, що дозволяє використовувати будь-яке доступне джерело тепла [3]. Це кардинально відрізняє його від двигунів внутрішнього згоряння, де паливо згоряє безпосередньо в камері згоряння. Закритий цикл роботи двигуна Стірлінга із застосуванням регенератора дає змогу значно підвищити ефективність використання енергії, що робить його перспективним рішенням для автономного енергопостачання. Важливим аспектом є використання різних робочих тіл, зокрема гелію чи водню, які забезпечують кращі термодинамічні характеристики порівняно зі звичайним повітрям. Це дає змогу досягати вищого коефіцієнта корисної дії у порівнянні з традиційними тепловими машинами.

Висока ефективність двигуна Стірлінга досягається за рахунок регенерації тепла та оптимізації теплообмінних процесів. На відміну від двигунів внутрішнього згоряння, які мають піковий ККД у межах 25–30 %, двигуни Стірлінга можуть демонструвати ефективність у діапазоні 40 % і вище [1]. У поєднанні з системами комбінованого виробництва тепла й електроенергії загальна ефективність мікро-ТЕЦ може досягати 90 %. Особливо ефективними є Stirling-генератори, що працюють від сонячного випромінювання у концентраційних сонячних електростанціях, де їхня ефективність перевищує традиційні фотоелектричні панелі. Наприклад, проєкт Maricopa Solar у США продемонстрував, що ефективність перетворення сонячного випромінювання на електроенергію може сягати 31 %, що значно перевищує середні показники фотогальванічних модулів.

Двигуни Стірлінга також є перспективними у сфері утилізації відпрацьованого тепла. Наприклад, японська компанія Yanmar розробила Stirling-генератор для промислових підприємств, що працює на базі відпрацьованого тепла в

діапазоні 500–800 °C, що дозволяє отримувати до 10 кВт електричної потужності без додаткового споживання палива. Така технологія особливо корисна в промислових процесах, де велика кількість тепла зазвичай викидається в навколишнє середовище. Використання Stirling-установок у промисловості дає змогу скоротити витрати на енергоресурси та покращити загальну енергетичну ефективність підприємств.

Окрім промислового застосування, двигуни Стірлінга демонструють високу ефективність у малих автономних системах енергопостачання. Наприклад, їх успішно інтегрують у мікро-ТЕЦ для приватних будинків, де можливе комбіноване виробництво електроенергії та тепла. Згідно з дослідженнями, використання Stirling-генераторів у таких системах дозволяє знизити викиди CO_2 щонайменше на 19 % [2] у порівнянні з традиційними газовими котлами. Це робить їх особливо привабливими для застосування в регіонах із жорсткими екологічними стандартами.

Ще однією важливою перевагою двигунів Стірлінга є їх безшумна робота. Оскільки згоряння відбувається за межами робочого циліндра, відсутні вибухові процеси, що характерні для двигунів внутрішнього згоряння. Це дозволяє використовувати такі установки в густонаселених районах, у медичних закладах, офісах і навіть житлових будинках без створення акустичного дискомфорту.

Попри значні переваги, існують певні виклики, які необхідно подолати для широкомасштабного впровадження Stirling-установок. Одним з головних є висока вартість виробництва через складність конструкції та потребу у високоякісних матеріалах для теплообмінників і регенераторів. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом масштабування виробництва та стандартизації технологічних процесів. Згідно з прогнозами, серійне виробництво двигунів Стірлінга може знизити їхню вартість на 30–40 % у найближчі 10 років, що зробить технологію доступнішою для масового застосування.

Ще одним перспективним напрямом є розвиток інтелектуальних систем керування для адаптації роботи двигуна до змінних навантажень та різних теплових джерел. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє оптимізувати режими роботи, підвищити загальну ефективність і зменшити зношування компонентів. Наприклад, сучасні мікро-ТЕЦ зі Stirling-генераторами оснащуються цифровими системами керування, які аналізують споживання енергії в реальному часі та автоматично налаштовують параметри роботи для мінімізації втрат.

Розвиток технології двигунів Стірлінга також передбачає інтеграцію з розумними енергомережами (Smart Grid). Це дозволить не лише покращити балансування навантажень, а й підвищити ефективність розподілу енергії у масштабах міста або навіть країни. Наприклад, у Німеччині вже тестуються локальні мікромережі, що включають Stirling-генератори у поєднанні з акумуляторами та сонячними панелями для забезпечення стабільного енергопостачання незалежно від погодних умов.

Таким чином, двигуни Стірлінга мають значний потенціал для підвищення енергоефективності локальних систем енергопостачання. Їхня універсальність у виборі джерел тепла, висока ефективність, можливість роботи у складі комбінованих систем виробництва тепла й електроенергії, екологічні переваги та безшумність роблять їх привабливим рішенням для різних секторів енергетики. Подальші дослідження мають бути зосереджені на зниженні вартості виробництва, вдосконаленні систем управління та інтеграції з сучасними енергомережами. Реалізація цих заходів сприятиме ширшому впровадженню двигунів Стірлінга та підвищенню ефективності використання енергетичних ресурсів у майбутньому.

Висновки

Подальші дослідження у цій сфері мають бути спрямовані на підвищення електричної ефективності, розширення сфери застосування технології, вдосконалення конструкційних рішень та інтеграцію з сучасними енергетичними мережами. Реалізація запропонованих заходів сприятиме підвищенню стабільності та ефективності локальних енергосистем, що є важливим кроком у напрямі розвитку сталої енергетики.

ПОСИЛАННЯ

1. Li, J., & Wang, F. (2022). Numerical investigations on the Stirling engine power and the efficiency of Stirling engine generator. Advances in Mechanical Engineering, 14(8), 1–8. https://doi.org/10.1177/16878132221117017
2. Alanne, K., Paatero, J., & Beausoleil-Morrison, I. (2012). Performance assessment of a Stirling engine plant for local micro-cogeneration. International Journal of Energy Research, 36(2), 218–230. https://doi.org/10.1002/er.1799
3. Нікітін, Є. С., Павленко, В. М. (2024). Технологічні переваги двигунів Стірлінга у виробництві електроенергії з теплових джерел. У Збірнику матеріалів Міжнародної наукової конференції «Освіта і наука в умовах викликів і загроз. Внесок молодих вчених в сталий розвиток» (с. 380). Національний університет біоресурсів і природокористування України. http://bit.ly/43xyTDS

УДК 621.31

УПРАВЛІННЯ ІНТЕГРАЦІЄЮ НАКОПИЧУВАЧІВ НА БАЗІ ВТОРИННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ В КОМПЛЕКСНИХ СИСТЕМАХ З ВДЕ: ПІДХІД НА ОСНОВІ ЦИКЛУ ДЕМІНГА (PDCA)

Г. П. Костенко[1], А. О. Запорожець[2]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (044) 294-67-01, e-mail: Kostenko_HP@nas.gov.ua

Запропоновано підхід до управління інтеграцією накопичувачів енергії на базі вторинних батарей електротранспорту в комплексних системах з ВДЕ з використанням циклу Демінга (PDCA). Поетапне планування, реалізація, перевірка та коригування стратегій управління накопичувачами забезпечує оптимальне балансування генерації та споживання, зменшує навантаження на мережу та продовжує життєвий цикл батарей. Особливу увагу приділено адаптивному регулюванню в умовах змінної генерації ВДЕ та аварійних ситуацій, що підвищує резильєнтність та надійність енергосистеми.

Ключові слова: *комплексні енергетичні системи, відновлювані джерела енергії (ВДЕ), вторинні батареї електротранспорту, інтеграція, цикл Демінга (PDCA)*

MANAGING THE INTEGRATION OF SECOND-LIFE EV BATTERY STORAGE IN COMPLEX RENEWABLE ENERGY SYSTEMS: A PDCA-BASED APPROACH

G. Kostenko[1], A. Zaporozhets[2]

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
tel.: (044) 294-67-01, e-mail: Kostenko_HP@nas.gov.ua

A PDCA (Plan-Do-Check-Act) cycle-based approach is proposed to enhance the efficiency of energy storage in complex renewable energy systems. It is determined that sequential planning, implementation, result evaluation, and strategy adjustment in energy storage management ensures optimal generation-load balancing, reduces grid stress, and extends battery lifespan. Special attention is given to adaptive energy storage management under variable renewable generation and emergency conditions, contributing to greater resilience and reliability of energy systems.

Key words: *complex energy systems, renewable energy sources, second life batteries, integration, PDCA cycle*

ORCID: [1]0000-0002-8839-7633,[2]0000-0002-0704-4116

Вторинні батареї електротранспорту (Second-Life EV Batteries, SLB) є перспективним рішенням для підвищення ефективності накопичувачів у комплексних системах з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) [1]. Застосування SLB дозволяє зменшити вартість енергетичних накопичувачів, забезпечити екологічні переваги за рахунок подовження життєвого циклу батар-от змінні характеристики деградації, економічна доцільність та адаптація до поточних регуляторних вимог [4].

Для ефективного управління цими процесами запропоновано використання циклу Демінга (PDCA – Plan-Do-Check-Act), що забезпечує структурований підхід до інтеграції та управління вторинними батареями в енергосистемах. Цей підхід дозволяє враховувати динамічні зміни параметрів батарей, оптимізувати процес їхнього використання та покращити надійність акумулювання енергії.

На етапі «Plan» (планування) визначаються основні технічні та економічні параметри інтеграції SLB у ВДЕ-мережі, проводиться аналіз деградації батарей, визначаються показники ефективності (ККД, рівень витрат, залишкова ємність) та оптимальні стратегії їх використання. Етап «Do» (реалізація) включає безпосереднє впровадження SLB у енергосистему шляхом тестування в реальних сценаріях: зберігання надлишкової енергії від ВДЕ, згладжування пікових навантажень, резервне живлення критичних об'єктів. На етапі «Check» (оцінка) проводиться моніторинг продуктивності батарей, оцінюється ефективність їхньої роботи за ключовими показниками, аналізуються ризики та визначаються можливості для покращення. Етап «Act» (коригування) спрямований на вдосконалення стратегії

інтеграції SLB, впровадження змін, масштабування успішних моделей, використання та адаптацію до нових технологічних викликів.

Для ефективного впровадження накопичувачів енергії на основі вторинних батарей електротранспорту у відновлювані енергосистеми необхідно застосовувати системний підхід. Одним з найбільш адаптивних методів управління інтеграцією таких технологій є цикл Демінга (PDCA), що забезпечує поступове вдосконалення процесів та мінімізацію ризиків. Основні етапи цього підходу наведено в Таблиці.

Таблиця. Інтеграція вторинних батарей електротранспорту в комплексні системи з ВДЕ за циклом Демінга

Етап інтеграції	Основні завдання	Очікувані результати
Plan (Планування)	- Визначення цілей інтеграції вторинних батарей у систему ВДЕ - Аналіз прогнозованих режимів роботи, очікуваних навантажень та сценаріїв експлуатації - Визначення ключових показників ефективності: рівень деградації батарей, LCOS, RTE, гнучкість у балансуванні мережі	- Формування стратегії інтеграції вторинних батарей у ВДЕ-системи - Чітке визначення ролі накопичувачів у забезпеченні стабільності мережі - Встановлення вимог до ефективності, надійності та економічної доцільності
Do (Реалізація)	- Пілотне впровадження накопичувачів у тестових умовах - Інтеграція вторинних батарей у систему розподіленої генерації (сонячні та вітрові станції) - Оптимізація зарядно-розрядних режимів для підвищення ефективності та зменшення деградації	- Отримання практичних даних про роботу накопичувачів у реальних умовах - Визначення технічних та економічних характеристик інтеграції - Виявлення початкових викликів та бар'єрів у процесі експлуатації
Check (Перевірка)	- Аналіз ефективності роботи накопичувачів за встановленими показниками ефективності - Оцінка впливу на стабільність та резильєнтність енергосистеми - Порівняння з альтернативними технологіями накопичення енергії	- Виявлення технічних та економічних недоліків і можливостей для покращення - Оцінка життєвого циклу вторинних батарей у нових умовах експлуатації - Формування рекомендацій для подальшої масштабної інтеграції
Act (Коригування)	- Оптимізація стратегій інтеграції та експлуатації вторинних батарей - Адаптація алгоритмів керування накопичувачами відповідно до реальних даних - Масштабування ефективних рішень на ширший рівень енергосистеми	- Поліпшення надійності, економічної ефективності та довговічності накопичувачів - Підготовка стандартів та регуляторних рекомендацій для підтримки інтеграції вторинних батарей - Сприяння розширенню застосування SLB у відновлюваній енергетиці та стійких мікромережах

Запропонована структура інтеграції дозволяє поетапно реалізувати процес впровадження вторинних батарей, враховуючи їхні технічні характеристики, економічну доцільність та вплив на енергосистему. Використання підходу PDCA сприяє підвищенню гнучкості систем накопичення енергії, покращенню балансування ВДЕ та забезпеченню стійкості електромережі.

ПОСИЛАННЯ

1. Kostenko G, Zaporozhets A. Transition from Electric Vehicles to Energy Storage: Review on Targeted Lithium-Ion Battery Diagnostics. Energies. 2024; 17(20):5132. https://doi.org/10.3390/en17205132
2. Kostenko, G. (2024). Accounting Calendar And Cyclic Ageing Factors In Diagnostic And Prognostic Models Of Second-Life EV Batteries Application In Energy Storage Systems. System Research in Energy, (3 (79), 21-34. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.021
3. Kostenko, G. (2025). Cluster Based Deployment Of Second Life Ev Batteries For Reliable And Sustainable Backup Power Solution In Power Systems. *System Research in Energy*, (1 (81), 40-60. https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.040
4. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2024). World Experience Of Legislative Regulation For Lithium-Ion Electric Vehicle Batteries Considering Their Second-Life Application In Power Sector. System Research in Energy, (2 (77), 97-114. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.097

УДК 621.311.25

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗМІРУ АВТОНОМНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ. МЕТОДИ ТА ПІДХОДИ

С. В. Новицький

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна,
тел.: (067) 231-14-63, e-mail: novytskyi.sergii@icloud.com

Проведено аналіз критеріїв, методів та інструментів, які можуть бути застосовані під час проєктування та впровадження автономних фотоелектричних систем. Здійснено огляд практичних результатів моделювання та проведено аналіз підходів до подолання обмежень існуючих методів оптимізації.

***Ключові слова**: фотовольтаїка, автономна система електропостачання, методи оптимізації.*

SIZING OF AUTONOMOUS POWER SUPPLY SYSTEMS USING PHOTOELECTRIC CONVERTERS. METHODS AND APPROACHES

S. Novytskyi

The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
20-A Gnata Hotkevycha str., Kyiv, Ukraine, 02094
phone: (067) 231-14-63, e-mail: novytskyi.sergii@icloud.com

An analysis of criteria, methods and tools that can be applied during the design and implementation of autonomous photovoltaic systems was conducted. A review of practical modeling results was conducted, and the approaches to overcoming the limitations of existing optimization methods were analyzed.

***Key words:** photovoltaics, solar cells, autonomous power supply system, optimization methods.*

ORCID: 0009-0005-5647-6635.

Розробка та впровадження автономних систем електропостачання, що базуються на фотоелектричних перетворювачах, вимагає детального проєктування. Одним з ключових аспектів у цьому процесі є визначення оптимального розміру компонентів таких систем, зокрема потужності фотоелектричних модулів, ємності акумуляторів та параметрів допоміжних накопичувачів енергії, що дозволяє забезпечити баланс між капітальними, експлуатаційними витратами та рівнем надійності системи.

Критерії щодо проєктування автономної системи електропостачання можна розділити на такі групи:

1. Технічні параметри: ймовірність втрати джерела живлення, ймовірність втрати навантаження, очікувана втрата навантаження, коефіцієнт еквівалентних втрат, загальна втрата енергії, стан заряду, рівень автономності тощо.
2. Економічні параметри: чиста приведена вартість, річна вартість системи, загальна вартість життєвого циклу, коефіцієнт відшкодування капіталу, середня вартість генерації енергії, зважена собівартість енергії тощо.
3. Екологічні вимоги.
4. Соціальні вимоги.

Вибір критеріїв оптимізації є важливим кроком для формулювання оптимізаційної задачі й побудови математичної моделі. Відзначимо, що в більшості розглянутих наукових робіт дослідники ставили перед собою задачі багатоцільової оптимізації, що впливало на вибір методів моделювання.

Методи визначення розміру автономних фотоелектричних систем можна класифікувати як інтуїтивні, чисельні, аналітичні, комерційні комп'ютерні інструменти, штучний інтелект (AI) і гібридні методи [1]. Методи штучного інтелекту (artificial intelligence) можуть бути використані для подолання відсутності метеорологічних даних для визначення розміру автономної фотоелектричної системи у віддалених районах. Вони допомагають обробляти нелінійні коливання джерела сонячної енергії, серед них можуть бути виділені алгоритми прогнозування, як-от штучна нейронна мережа (artificial neural network) і генетичний алгоритм (genetic algorythm) для прогнозування коефіцієнтів розміру автономної фотоелектричної системи, а також алгоритми пошуку – нечітка логіка (fuzzy logic) і пошук табу (tabu search).

Доступні методології визначення розміру автономної системи електропостачання представлені на рис. 1.

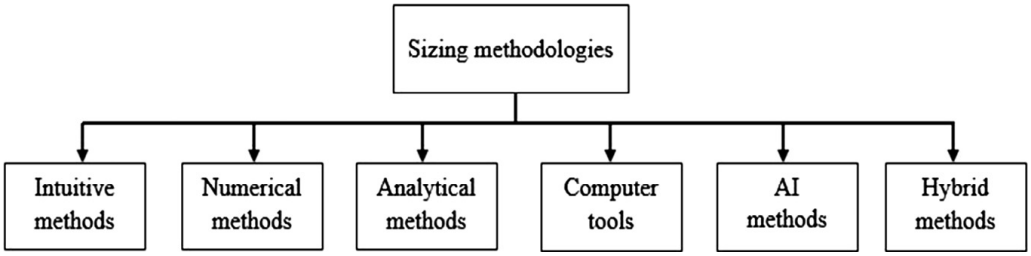


Рис. 1. Методології визначення розміру автономної системи електропостачання

Кожен із зазначених вище методів оптимального визначення розміру автономної фотоелектричної системи має обмеження, які наведені в табл. 1.

Таблиця 1. Обмеження методів визначення оптимального розміру автономної системи електропостачання [2]

Метод визначення розміру	Вхідні дані	Обмеження
Інтуїтивні	Середньодобові та середньомісячні метеорологічні дані	Прості розрахунки, які використовуються на основі щоденних або місячних метеорологічних даних, можуть призвести до завищення / заниження розміру системи, низької надійності й збільшення капітальних витрат, витрати на обслуговування та експлуатацію
Чисельні	Середньодобові та середньомісячні метеорологічні дані	Досягаються субоптимальні рішення, оскільки розрахунки включають лінійні зміни перемінних задачі
Аналітичні	Середньодобові та середньомісячні метеорологічні дані	Менш гнучкий у проєктуванні автономної фотоелектричної системи, оскільки продуктивність оцінюється за допомогою обчислювальних моделей
Програмні засоби	Середньодобові та середньомісячні метеорологічні дані	Неможливість покращити компоненти системи та внести зміни до специфікації окремого компонента
Штучного інтелекту	Середньодобові та середньомісячні метеорологічні дані	Складність проєктування компонентів системи
Гібридні	Середньодобові та середньомісячні метеорологічні дані	Складність проєктування компонентів системи, які базуються на складних функціях алгоритму

Робота науковців направлена зокрема на оптимізацію підходів та методів вирішення розмірних задач для конкретних кейсів. Проведений огляд наукової літератури свідчить про успішну практику застосування різних підходів до оптимізації розміру автономих систем електропостачання залежно від вхідних умов проєктування.

Висновки:

1. Серед розглянутих наукових робіт для автономних систем електропостачання найбільший інтерес викликають ті, що стосуються критеріїв ймовірності втрати навантаження (LLP, Loss of load probability) та ймовірності втрати джерела живлення (LPSP, Loss of power supply probability). Серед економічних параметрів найвагомішою є зважена вартість електроенергії (LCOE, Levelized cost of energy), особливо для випадків, де автономна система електропостачання розглядається як альтернатива стабільному живленню від мережі.
2. Недоліками традиційних методів оптимізації є низька точність розрахунків і тривалий час обчислення. Попри складності проєктування компонентів системи, штучний інтелект (AI) є перспективним інструментом, який можна використовувати для подолання недоліків класичних методів.
3. Серед традиційних методів оптимізації найширше використовуються ітераційний метод і цілочисельне лінійне програмування, а серед методів штучного інтелекту – генетичний алгоритм (GA) і оптимізація роєм частинок (PSO). Ці методи все ще страждають від проблем конвергенції, і в певних випадках часто доцільне застосування гібридного підходу для забезпечення високоякісних рішень.

ПОСИЛАННЯ

1. Tamer Khatib, Ibrahim A. Ibrahim, Azah Mohamed, A review on sizing methodologies of photovoltaic array and storage battery in a standalone photovoltaic system, Energy Conversion and Management 120, 2016, pp 430–448, http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.05.011.
2. Jean Guetinsom Kafando, Daniel Yamegueu, Etienne Tchoffo Houdji, Review on sizing and management of stand-alone PV/WIND systems with storage, Heliyon 10 (2024) e38080, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e38080.

УДК 621.311.25

ІМПЛЕМЕНТАЦІЯ ДАНСЬКОЇ МОДЕЛІ ДЕМОКРАТИЧНОЇ «ЗЕЛЕНОЇ» ЕНЕРГЕТИКИ, НА ПРИКЛАДІ КОБЛІВСЬКОЇ ГРОМАДИ МИКОЛАЇВСЬКОГО РАЙОНУ МИКОЛАЇВСЬКОЇ ОБЛАСТІ, ЯК ПІЛОТНОГО ПРОЄКТУ СТРАТЕГІЇ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ УКРАЇНИ НА ПЕРІОД ДО 2035 РОКУ

Ю. Л. Борзунов[1], В. П. Киливник[2]

ТОВ «ПРОДУКТ СОНЯЧНОГО СВІТЛА», Україна
вул. Шмідта, 14, оф. 5, с. Рибаківка Миколаївського району Миколаївської обл., 57460, Україна,
тел.: (050) 949-18-10, (066) 436-98-59, e-mail: kiluvnik@gmail.com, salt_prom@ukr.net

Проведено дослідження, ціллю якого було створення Стратегії розвитку розподіленої генерації Коблівської територіальної громади, структури Причорноморського енергетичного хаба, на території цієї громади.

Ключові слова: *енергетичний хаб, «зелена» енергетика, розподілена генерація, розумні мережі, альтернативні джерела енергії, Березанське вітрополе, інсоляція, сонячний модуль, енергоефективність*

IMPLEMENTATION OF THE DANISH MODEL OF DEMOCRATIC "GREEN" ENERGY ON THE EXAMPLE OF THE KOBLIV COMMUNITY, MYKOLAIV DISTRICT, MYKOLAIV REGION AS A PILOT PROJECT OF GENERATION OF UKRAINE FOR THE PERIOD UNTIL 2035

Yu. Borzunov[1], V. Kylyvnyk[2]

LLC "SOLAR LIGHT PRODUCT", Ukraine
14 Shmidta St., office 5, Rybakivka village, Mykolaiv district, Mykolaiv region, 57460, Ukraine,
phone.: (050) 949-18-10, (066) 436-98-59, e-mail: kiluvnik@gmail.com, salt_prom@ukr.net

The work conducted a study aimed at creating a Strategy for the Development of Distributed Generation in the Koblivka Territorial Community, as well as the structure of the Black Sea Energy Hub in the territory of this community.

Key words: *energy hub, green energy, distributed generation, smart grids, alternative energy sources, Berezanske wind farm, insolation, solar module, energy efficiency*

ORCID: [1] 0009-0006-0583-644X

Об'єктом дослідження стала Коблівська сільська територіальна громада Миколаївського району Миколаївської області України з її відновлювальними енергетичними ресурсами, згідно з рекомендаціями Каталогу критично важливих технологій для енергетичного сектору України, створеного Данським енергетичним агентством та Міністерством енергетики України, з урахуванням даних Атласу енергетичного потенціалу відновлювальних джерел України, розробленого Інститутом відновлювальної енергетики НАН України. За висновками Міжгалузевого науково-технічного центру вітроенергетики НАН України, частина території Миколаївської області має високий вітроенергетичний потенціал, що оцінюється в 10%, або 2500 км^2. Одним з найперспективніших майданчиків загальною площею 4000 га є Березанське вітрополе з потенціалом ВЕС до 2500 МВт. Щодо сонячної інсоляції, то потенціал території Коблівської сільської територіальної громади становить 1400 кВт/м^2 на рік. Високим рівнем активності вважаються показники 5 кВт/м^2 на день, а на території громади в літній період коефіцієнт часто перевищує позначку 6 одиниць [7].

Предметом дослідження стала Данська модель демократичної «зеленої» енергетики з погляду імплементації та впровадження її на території Коблівської сільської територіальної громади з урахуванням законодавчої бази України.

Метою дослідження є :

- створення Стратегії розвитку розподіленої генерації Коблівської територіальної громади до 2035 року;
- розробка та затвердження енергетичного плану до 2030 року;

- створення енергетичного хабу (вітрова, сонячна, біомаса, накопичувачи енергії когенераційні установки, які будуть інтегровані в хаб за рахунок впровадження «розумних» мереж), що також включатиме освітню, дослідницьку та інноваційну складові енергетичної моделі Королівства Данія.

Пропонується створити центр розподіленої «зеленої» генерації задля сталого розвитку Коблівської сільської територіальної громади

ТОВ «Продукт сонячного світла» є замовником будівництва енергооб'єктів на території громади, ведуться перемовини, готується укладання договору з Данською компанією «Вестас» з постачання енергетичного обладнання (турбін потужністю по 6 МВт). Для комплексного вирішення енергетичного питання готується підписання договору pre-PPA з компанією АТ «Енергетична компанія України» на викуп «зеленої» енергії на стадії проєктування потужностей з її виробництва як майбутнього енергетичного хаба на території Коблівської ТГ.

Очікувані результати створення енергетичного хаба:

- Енергетична незалежність Коблівської сільської територіальної громади
- Створення енергетичного кооперативу за данськими моделями:
  - **Middelgrunden Wind Cooperative.** Цей кооператив розташований поблизу Копенгагена і є одним з найбільших у світі. Він об'єднує місцевих жителів, які інвестували у вітрові турбіни, що забезпечують електроенергією значну частину міста.
  - **Samsø Energy Academy.** Острів Самсё став прикладом енергетичної незалежності завдяки кооперативам, які керують вітровими турбінами, сонячними панелями та біомасовими установками. Місцеві жителі беруть активну участь у цих проєктах.
  - **Thy-Mors Energy Cooperative.** Цей кооператив спеціалізується на використанні біомаси для виробництва тепла та електроенергії. Він об'єднує фермерів і місцеві громади для спільного використання ресурсів;
- Відкриття філіалу Данського центру відновлювальної енергетики Фолькцентр з демонстраційним майданчиком та навчальним центром в с. Тузли Коблівської громади
- Створення альтернативної логістики з доставки елементів енергетичного обладнання вітротурбін (насамперед лопатей), виробництво їх на місці, в індустріальному парку «Рибаківський» на території Коблівської громади
- Створення сервісної компанії з обслуговування ВЕС як існуючих, так і тих, що будуються; переробка та утилізація лопатей ВЕС після терміну їх експлуатації, з України та Європи
- Збільшеня надходження до бюджетів усіх рівнів
- Створення нових робочих місць для мешканців Коблівської ТГ
- Підвищення інвестиційного, ділового та економічного іміджу Коблівської ТГ
- Забезпечення реалізації державних програм щодо залучення інвестицій, підтримки підприємництва, соціальних програм
- Збільшення обсягу залучених у реальний сектор економіки громади інвестицій
- Залучення новітніх технологій виробництва товарів та послуг
- Підвищення соціальних стандартів життя мешканців Коблівської ТГ та регіону

ПОСИЛАННЯ

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії: Закон України від 15.02.2022 № 2046-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#n8 (дата звернення: 15.07.2022).
2. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 04.11.2021).
3. Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 29.11.2022 № 1592. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1592874-22#n2 (дата звернення: 04.03.2023).
4. Про затвердження Правил ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 307. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text (дата звернення: 04.11.2021).

5. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 308. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text (дата звернення: 03.09.2021).
6. Постанова № 559 від 2017 року, про створення Координаційного центру для впровадження нового ринку електроенергії.
7. https://www.solar-battery.com.ua/karta-solnechnoy-aktivnosti-v-ukraine/
8. Закон України № 3220-IX від 30.06.2024 «Про відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України»
9. Постанова 1173 від 15.10.2024 «Про затвердження Порядку відбору проєктів у сферах альтернативних видів палива, енергоефективності та енергозбереження, які підлягають фінансуванню згідно з Рамковою угодою між Урядом України та Урядом Королівства Данія щодо загальних умов та процедур, організаційних заходів та фінансових умов реалізації програми Danida Business Finance в Україні».
10. Концепція Державної цільової економічної програми стимулювання розвитку розподіленої генерації електричної енергії з відновлювальних джерел на період до 2030 року.
11. Указ Президента України від 30 вересня 2019 р. № 722 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року».
12. Каталог критично важливих технологій для енергетичного сектору України Міністерства Енергетики України та Дансьного Енергетичного Агенства за січень 2024 року.

«МІНІПІЧ» – АВТОНОМНИЙ ГЕНЕРАТОР ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

М. С. Пасько[1], О. А. Коваленко[1], О. В. Козленко[2]

[1] Політехнічний ліцей НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ,
тел.: +380984697841, e-mail: maximpaskoserhi@gmail.com
[2] НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна

Анотація: *Робота присвячена розробці та практичній реалізації компактного автономного генератора електроенергії на основі ефекту Зеєбека з використанням доступних матеріалів як палива. Отримані результати підтверджують можливість його широкого застосування в умовах відсутності централізованого енергопостачання: у воєнних, туристичних чи екстремальних ситуаціях.*

Ключові слова: *термоелектричні явища, ефект Заєбека, модуль Пельтьє, автономний генератор електроенергії, альтернативна енергетика.*

“MINIFURNACE” – AUTONOMOUS ELECTRICITY GENERATOR

M. Pasko[1], O. Kovalenko[1], O. Kozlenko[2]

[1] Polytechnic Lyceum of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
tel.: +380984697841, e-mail: maximpaskoserhi@gmail.com
[2] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
37 Beresteiskyi prospect., Kyiv, Ukraine

Abstract: *The work is devoted to the development and practical implementation of a compact autonomous electricity generator based on the Seebeck effect, utilizing accessible materials as fuel. The obtained results confirm its potential for widespread use in conditions lacking centralized power supply, such as military, touristic, or extreme situations.*

Key words: *thermoelectric phenomena, Seebeck effect, Peltier module, autonomous generator, alternative energy.*

Однією з актуальних проблем сучасності є забезпечення автономними джерелами електроенергії. Це питання особливо загострюється в умовах нестачі централізованого електропостачання: на фронті, в екстремальних умовах, під час природних катаклізмів, а також під час туризму і походів. Існуючі джерела, як-от сонячні панелі, вітрогенератори або ручні динамо-машини, мають обмеження через залежність від погодних умов чи фізичних зусиль користувача.

Саме тому особливої актуальності набувають автономні термоелектричні генератори, які можуть працювати за будь-яких погодних умов, використовуючи ефект Зеєбека для перетворення чистого тепла на електроенергію. Запропонована розробка – це компактний, мобільний і дешевий пристрій, що дозволяє генерувати електроенергію за допомогою доступного палива (відходи деревини, сухий спирт тощо). Такий пристрій стане незамінним як на передовій, так і в цивільному використанні для побутових потреб, відповідаючи концепції сталого енергозабезпечення та енергоефективності.

У межах роботи було створено діючий прототип автономного термоелектричного генератора «Мініпіч». Основу конструкції складають два модулі Пельтьє, що перетворюють теплову енергію на електричну завдяки ефекту Заєбека. Корпус пристрою був виготовлений з недорогих і доступних матеріалів, що робить його простим у виготовленні, використанні та ремонті.

Під час експериментального тестування розробленого генератора при температурній різниці близько 150 °C було отримано стабільну напругу близько 6 В, що є достатнім показником для ефективного заряджання портативних електронних пристроїв, наприклад рацій, смартфонів, ліхтариків тощо. Запропонована конструкція забезпечує автономність, незалежність від погодних умов, простоту, доступність виготовлення, можливість використання широкого спектру доступного палива, компактність та легкість транспортування.

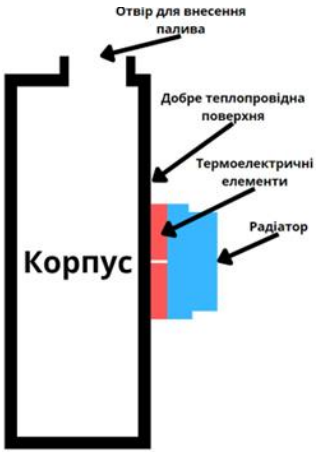


Рис. 1. Схема будови термогенератора «Мініпіч»

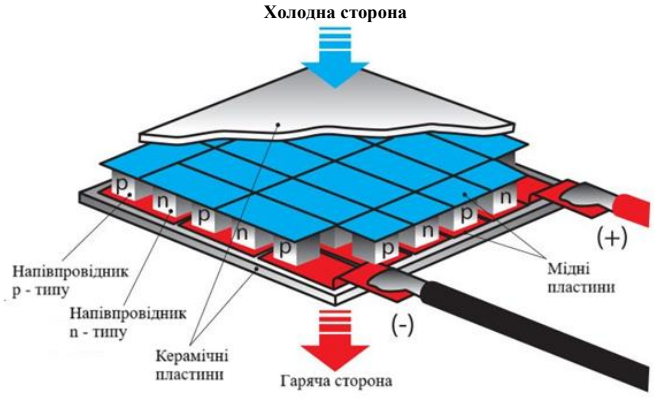


Рис. 2. Схема будови термоелектричного елемента

Зображення прототипу термогенератора «Мініпіч»

Таким чином, створена розробка демонструє практичну перспективність для забезпечення енергонезалежності у випадках відсутності централізованого енергопостачання, що може бути використано в польових умовах, туризмі та надзвичайних ситуаціях.

УДК 621.316.9

ВІДЕОМОНІТОРИНГ РОЗРЯДІВ БЛИСКАВКИ У ХМАРАХ ДЛЯ АНАЛІЗУ ІНДУКОВАНИХ ПЕРЕНАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛАХ

Є. О. Троценко[1], А. Г. Харфорд[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна, тел.: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

У цій роботі показано, що відеомоніторинг розрядів бликавки у хмарах дозволяє доповнити традиційні засоби, як-от електромагнітні датчики, і дає важливу візуальну інформацію про тип, динаміку та структуру розрядів. Такий підхід може допомогти встановити кореляції між параметрами розряду та величинами індукованої перенапруги.

Ключові слова: *розряди блискавки, відеомоніторинг, індуковані перенапруги.*

VIDEO MONITORING OF LIGHTNING DISCHARGES IN CLOUDS FOR ANALYSIS OF INDUCED OVERVOLTAGES IN ELECTRICAL CIRCUITS

Y. Trotsenko[1], A. Harford[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056 phone: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

In this work, it is shown that video monitoring of lightning discharges in clouds can complement traditional tools such as electromagnetic sensors and provide important visual information about the type, dynamics, and structure of the discharges. This approach may help establish correlations between the discharge parameters and the values of induced overvoltages.

Key words: *lightning discharges, video monitoring, induced overvoltages.*

ORCID: [1]0000-0001-9379-0061; [2]0000-0002-9898-6474.

Серед розрядів блискавки виділяють дві основні групи: перша охоплює розряди, що відбуваються між окремими грозовими хмарами або всередині однієї хмари, тоді як друга група – це розряди між хмарами та землею. Останні становлять особливу загрозу для об'єктів енергетичної інфраструктури, оскільки можуть спричиняти значні пошкодження обладнання та ізоляції в електричних мережах. Для виникнення перенапруги в електричних мережах не обов'язково, щоб блискавка безпосередньо влучала у фазний провідник. Імпульси індукованої перенапруги можуть виникати, коли блискавка влучає в землю поблизу лінії електропередачі, створюючи потужне електромагнітне поле. Це поле спричиняє наведення струмів у проводах, що може призводити до перенапруги, здатної пошкоджувати ізоляцію та електрообладнання навіть без прямого удару блискавки в саму лінію. Вплив атмосферної електрики на електричні кола привертав увагу інженерів-електротехніків ще на початку XX століття, ставши об'єктом їхніх досліджень уже в той час [1]. Сьогодні індукована перенапруга, викликана ударом блискавки поблизу розподільних ліній електропередачі, є однією з найпоширеніших причин відключень та пошкодження електричного обладнання в розподільних мережах [2, 3]. У наведених вище випадках причиною перенапруги є розряди блискавки між хмарою та землею. Проте розряди блискавки, що відбуваються як між окремими грозовими хмарами, так і всередині однієї хмари, також можуть спричиняти виникнення завад або підвищення напруги в електричних контурах. Це явище може спостерігатися у низьковольтних електричних колах, оскільки потужні електромагнітні імпульси, що супроводжують такі розряди, здатні наводити струми в провідниках на значній відстані від місця удару. Такі впливи можуть призводити до збоїв у роботі електронних систем на основі мікропроцесорів [4], зокрема систем керування та автоматики, телекомунікаційного обладнання, комп'ютерних мереж. Розряди блискавки у хмарах можуть впливати на роботу пристроїв розумних електричних мереж, зокрема через створення сильних електромагнітних імпульсів, що наводять перенапругу в чутливих електронних компонентах [5, 6]. Тому дослідження, спрямовані на виявлення розрядів блискавки в реальному часі, також сприяють підвищенню стабільності та надійності систем Smart Grid. Одним із напрямів є розробка та впровадження систем автоматизованої відеореєстрації розрядів блискавки [7], які допомагають оперативно реагувати на потенційні загрози й удосконалювати методи захисту

електричних систем. На рис. 1 наведено результати проведених випробувань експериментальної системи для автоматичної відеореєстрації спалахів блискавки на основі програмного забезпечення для відеоспостереження [8].

Рис. 1. Близькі (ліворуч) та віддалені (праворуч) розряди блискавки у хмарах, що були зареєстровані автоматичною системою відеореєстрації

Позитивним результатом є те, що розроблена система дозволяє успішно реєструвати як близькі, так і віддалені спалахи блискавки, зафіксовані об'єктивом вебкамери. Відеозапис розряду блискавки у хмарах або між хмарами, що спричинив індуковану перенапругу на відстані від місця спалаху, може бути важливим для розуміння механізмів впливу атмосферної електрики на електромережі. Такий запис дозволяє дослідити характеристики розряду, включно з його тривалістю, структурою та інтенсивністю, що сприяє визначенню електромагнітного поля, створюваного блискавкою. Аналіз відеоданих у поєднанні з вимірюваннями електромагнітного поля, напруги та струму допомагає встановити механізм індукції перенапруги, уточнити моделі поширення електромагнітних імпульсів у просторі та перевірити ефективність заходів електромагнітної сумісності. Крім того, такий запис може бути корисним для оцінки ризиків пошкодження обладнання, розслідування перехідних явищ у мережах та розробки вдосконалених методів захисту від вторинних впливів блискавки.

ПОСИЛАННЯ

1. C. P. Steinmetz, "Lightning phenomena in electric circuits", Proceedings of the American Institute of Electrical Engineers, 1907, vol. 26, no. 3, pp. 303–325, doi: 10.1109/PAIEE.1907.6742407.
2. T. Lei, H. Shen, X. Zhao, Z. Guo, "A simplified calculation method for induced lightning overvoltage of 10 kV overhead lines", 2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC), Harbin, China, 2024, pp. 5188-5193, doi: 10.1109/CIEEC60922.2024.10583494.
3. S. Wang, Y. Fan, J. Wang, Z. Kong, L. Cai, D. Lu, "Waveform analysis of lightning induced overvoltages on 10 kV distribution lines", 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Hong Kong, China, 2019, pp. 1–5, doi: 10.1109/APL.2019.8816027.
4. N. Sapumanage, S. Nanayakkara, S. Abegunawardana, M. Fernando, V. Cooray, "Time-frequency and energy correlations of the transient voltages triggered by cloud to cloud discharges", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2019, vol. 61, no. 6, pp. 1782–1792, doi: 10.1109/TEMC.2018.2873829.
5. S. Silfverskiold, R. Thottappillil, M. Ye, V. Cooray, V. Scuka, "Induced voltages in a low-voltage power installation network due to lightning electromagnetic fields: an experimental study", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 1999, vol. 41, no. 3, pp. 265–271, doi: 10.1109/15.784166.
6. C. F. Barbosa, F. E. Nallin, "Lightning protection of a smart grid sensor", Electric Power Systems Research, 2015, vol. 118, pp. 83–88, doi: 10.1016/j.epsr.2014.05.017
7. B. Huang, Z. Fu, J. Chen, C. Gu, "Remote online observation system of power system lightning stroke", 2014 International Conference on Lightning Protection (ICLP), Shanghai, China, 2014, pp. 922–926, doi: 10.1109/ICLP.2014.6973255.
8. Video Surveillance Software. URL: https://www.ispyconnect.com/download (дата звернення: 25.01.2025).

УДК 621.311.25

КОМБІНОВАНА СИСТЕМА ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МІСТ УКРАЇНИ

О. О. Рубаненко[1], М. Р. Аліпатова[2]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02000, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: rubanenk@fel.zcu.cz

Децентралізовані енергетичні системи забезпечують надійність енергопостачання, сприяють сталому розвитку та зменшенню вразливості критичної інфраструктури України до зовнішніх впливів.

Ключові слова: *децентралізована енергетика, відновлювані джерела енергії, енергетична безпека, енергозбереження, критична інфраструктура, гібридні системи.*

COMBINED POWER GENERATION SYSTEM FOR DECENTRALISATION OF ENERGY SUPPLY TO CRITICAL INFRASTRUCTURE OF UKRAINIAN CITIES

O. Rubanenko[1], M. Alipatova[2]

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
20A Hnata Khotkevycha Str., Kyiv, 02000, Ukraine,
tel.: (044) 206-28-09, e-mail: rubanenk@fel.zcu.cz

Decentralized energy systems ensure reliable power supply, promote sustainable development, and reduce the vulnerability of Ukraine's critical infrastructure to external impacts.

Key words: decentralised energy, renewable energy sources, energy security, energy saving, critical infrastructure, hybrid systems.

ORCID: [1]0000-0002-2660-182X; [2]0000-0000-0000-0000.

Після початку повномасштабного вторгнення росії в Україну енергетична система країни опинилася в надзвичайно важкому становищі. Близько двох третин її генерувальних потужностей було зруйновано, окуповано або пошкоджено, що призвело до постійних відключень електроенергії та значного дефіциту. 2025 рік очікується з нестачею до 6 ГВт потужності, що змушує шукати швидкі та ефективні рішення. Централізована система енергопостачання виявилася надзвичайно вразливою до атак, через що країна переживає гостру потребу у впровадженні децентралізованих енергетичних ресурсів (DER). Саме DER можуть стати ключем до забезпечення стабільності, безпеки та гнучкості енергетики в умовах сучасних викликів.

Наукова робота спрямована на пошук оптимальних рішень комбінованої системи генерування електроенергії на базі децентралізованих рішень, яка відповідала б нагальним потребам критичної інфраструктури міст України. Така система має поєднувати відновлювані джерела енергії, акумулятори та нестандартні інноваційні технології (стартапи) для створення стійкого енергопостачання, що сприятиме енергетичній безпеці та декарбонізації.

Також окрім впровадження сучасних енергоощадних технологій були розроблені додаткові необхідні рекомендації, що мають на меті прискорення процесу децентралізації енергетичної системи.

- **Сформувати бачення децентралізованої енергосистеми України**. Необхідно розробити цілісну стратегію впровадження DER, яка поєднає відновлення енергосистеми з довгостроковими цілями: стійкістю, декарбонізацією та доступністю. Важливо координувати роботу різних секторів, розвивати місцеве виробництво, підвищувати кваліфікацію працівників енергетики й адаптувати законодавчу базу.
- **Удосконалити регуляторну базу.** Варто усунути бар'єри, які гальмують розгортання DER, запровадити тарифні реформи для залучення споживачів та стимулювання енергоефективності. Це сприятиме кращому управлінню попитом і зменшенню пікових потреб у потужності.
- **Реформувати ринок електроенергії.** Потрібно створити умови для інтеграції DER у ринок електроенергії та додаткових послуг, усунути спотворення ринку, впровадити гнучкі цінові сигнали, що враховують локальні та часові особливості. Це допоможе інвестувати в оптимальні технології.

- **Посилити спроможності на рівні накопичення, передачі та розподілу.** У зв'язку зі збільшенням встановленої потужності DER в СН та НН мережах виникає потреба в їх модернізації. Керування мережами з DER є актуальною задачею, що може бути вирішеною розділенням ролі операторів передачі (TSO) та розподілу (DSO). Це вимагатиме впровадження інтегрованого підходу до управління енергосистемою.
- **Забезпечити моніторинг і контроль активів для захисту системи.** Необхідно створити інфраструктуру даних для планування та управління, наприклад реєстри DER і розумні лічильники. Це сприятиме безпеці системи, участі споживачів й інтеграції нових моделей, таких як віртуальні електростанції (VPP). Кібербезпека є критично важливою в цьому контексті.
- **Запровадити фінансові механізми для масштабування DER.** Слід поєднувати державне, донорське та приватне фінансування для зниження вартості капіталу в енергетиці України. Розробка законодавства для залучення приватних інвестицій дозволить розширити впровадження DER навіть після завершення війни. Важливо також підтримувати інвестиції на регіональному рівні.

Методологія дослідження передбачає аналіз міжнародного досвіду впровадження DER, моделювання енергетичних потреб критичної інфраструктури та оцінку економічної доцільності різних сценаріїв впровадження. Основна увага приділяється інтеграції цих рішень з європейськими енергетичними мережами, що дозволить не лише посилити енергетичну незалежність України, але й сприяти її інтеграції до європейського енергетичного ринку.

Європейський досвід: децентралізація енергетичних систем

У Європі активно впроваджується децентралізоване управління енергетикою. Одним із прикладів є Фельдхайм у Німеччині – перше енергетично незалежне село, що використовує виключно місцеві відновлювані джерела енергії. Це вітрові турбіни й сонячні панелі, які повністю забезпечують потреби громади. Інфраструктура Фельдхайма передбачає локальну мережу розподілу електроенергії, що підвищує стійкість системи та захищає її від зовнішніх загроз.

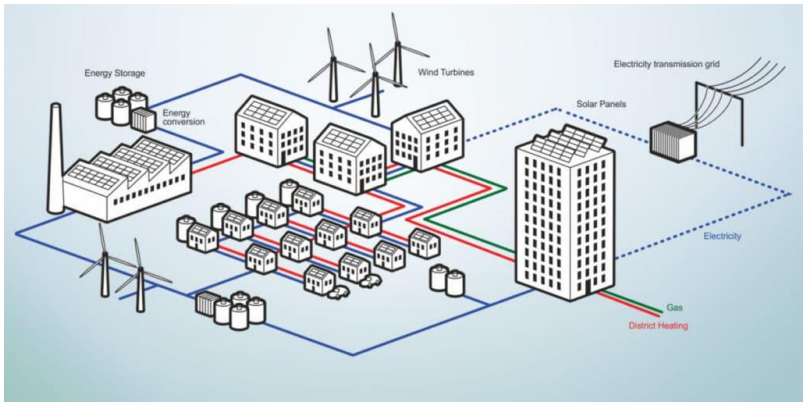


Рис. 1. Приклад децентралізованої системи міста Фельдхайм, Німеччина

Висновки: Впровадження децентралізованих енергетичних ресурсів є ключовим кроком до забезпечення енергетичної безпеки України. Ці рішення не лише допоможуть вирішити нагальні проблеми дефіциту електроенергії, але й створять основу для довгострокової декарбонізації та інтеграції країни до європейських ринків. Локалізація енергетичних рішень, їхня модульність та стійкість до атак роблять DER оптимальним вибором для сучасних умов України, що перебуває в стані війни. Завдяки цьому підходу можна забезпечити надійне постачання електроенергії для критичної інфраструктури, підвищити енергетичну незалежність та сприяти сталому розвитку країни.

ПОСИЛАННЯ

1. IEA. Empowering Ukraine through a Decentralised Electricity System. International Energy Agency, 2023. URL: https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system (дата звернення: 23.12.2024).
2. Про затвердження Національного плану з енергетики та клімату: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 13.10.2024. URL: https://www.kmu.gov.ua/en/news/ukraina-zatverdyla-natsionalnyi-plan-z-enerhetyky-ta-klimatu-v-den-pochatku-peremovyn-pro-vstup-do-ies.
3. Про затвердження Правил ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 307. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text (дата звернення: 04.11.2021)

УДК 621.316.1

ФАЗОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТОТИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В ЗАДАЧАХ МОНІТОРИНГУ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В. П. Малько[1], Ю. В. Куц[2], С. І. Ковтун[3], В. Ю. Куц[4]

[1, 2, 3, 4]Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна
[2]НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна, тел.: (098) 995-66-10, e-mail: [1]VovaViking03@gmail.com

Запропоновано метод прецизійного визначення основної частоти напруги електропостачання за умов дії вищих гармонік, шляхом застосування фазового методу, який базується на перетворенні Гільберта. Метод дає змогу оцінювати основну частоту з високою точністю та може бути використаний для моніторингу показників якості електроенергії.

Ключові слова: *оцінювання частоти, дискретне перетворення Гільберта, моніторинг показників якості електроенергії.*

THE PHASE METHOD OF DETERMINING THE SUPPLY VOLTAGE FREQUENCY IN THE TASKS OF MONITORING THE POWER QUALITY INDICES

V. Malko[1], Y. Kuts[2], S. Kovtun[3], V. Kuts[4]

[1, 2, 3, 4]General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine, 172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
2National Techn. University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Pr. Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (098) 995-66-10, e-mail: [1]VovaViking03@gmail.com

Method of precise determination of the fundamental frequency of the supply voltage under the influence of higher harmonics is proposed by applying the phase method based on the Hilbert transform. The method makes it possible to estimate the fundamental frequency with high accuracy and can be used to monitor the power quality indices.

Key words: *frequency estimation, discrete Hilbert transform, monitoring of power quality indices.*

ORCID: [1]0000-0003-2879-7915; [2]0000-0002-8493-9474, [3]0000-0002-6596-3460, [4]0000-0002-1939-0032

Для моніторингу показників якості електроенергії здебільшого застосовують дискретне перетворення Фур'є (ДПФ). Однак для забезпечення високої точності гармонічного аналізу необхідно застосування додаткових методів усунення основного недоліку ДПФ – ефекту витоку спектра ДПФ. Витік спектра ДПФ приводить до перерозподілу енергії вищих гармонік на суміжні частотні компоненти спектра Фур'є, що призводить до зменшення точності оцінювання показників якості. Одним з варіантів його усунення є узгодження параметрів збору даних: частоти дискретизації та обсягу вибірки з основною частотою напруги електропостачання.

У цій роботі запропоновано фазовий прецензійний метод визначення основної частоти напруги електропостачання, що базується на застосуванні дискретного перетворення Гільберта (ДПГ), а також підтверджено ефективність запропонованого методу модельними дослідженнями. Вихідні дані моделювання: частота та амплітуда першої гармоніки f_1 – 50,12 Гц та U_1 – 230 В, частота дискретизації f_s – 12,80 КГц, час аналізу T_a – 0,16 с, обсяг вибірки напруги J – 2048 відліків, кількість вищих гармонік H – 12 порядку 2, 3, 5, 7, 12, 13, 16, 19, 22, 25, 29, 30 з амплітудами U_2 = 11,5 В, U_3 = 10,35 В, U_5 = 3%, U_7 = 6,9 В, U_{12} = 2,3 В, $U_{13} = U_{16} = U_{19} = U_{22} = U_{25} = U_{29} = U_{30}$ = 1,15 В

Модель напруги електропостачання загальної призначеності в дискретній формі має такий вигляд [1]:

$$u[j] = U_1 \cos\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} j - \varphi_1\right) + \sum_{h=2}^{H} U_h \cos\left(2\pi h \frac{f_1}{f_s} j - \varphi_h\right) = U[j]\cos\Phi[j],\ \ j = \overline{1,J},\ J = \left[T_a\ f_s\right]^+,\ U_1 >> U_h \quad (1)$$

де U_1, f_1, φ_1 – відповідно амплітуда, частота та початкова фаза 1-ї гармоніки, а U_h та φ_h – відповідно амплітуда та початкова фаза h-ї гармоніки, T_a – час аналізу сигналу, $U[j]$,$\Phi[j]$ – відповідно обвідна та повна фаза напруги.

Модель напруги після застосування ДПГ складається з двох компонентів – послідовності відліків напруги $u[j]$ та отриманого Гільберт-образу напруги $u[j]$ [2].

$$\dot{z}[j]=u[j]+iu[j]=U[j]cos\Phi[j], \quad j=\overline{1,J},\ J=[T_a\ f_s]^+ \tag{3}$$

Розрахунок фазової характеристики проводиться за даними моделі (3) та має такий вигляд [3]:

$$\Phi[j]=arctg\frac{u[j]}{u[j]}+\frac{\pi}{2}\left\{2-sign\left(u[j]\right)\cdot\left(1+sign\left(u[j]\right)\right)\right\},\ j=\overline{1,J} \tag{4}$$

Визначення основної частоти напруги проводиться для частини фазової характеристики (4), отриманої графічним чи аналітичним способом, з найменшим відхиленням фазової характеристики за формулою

$$f_1=\frac{1}{2\pi}\cdot\frac{\Phi_2[j_2]-\Phi_1[j_1]}{(j_2-j_1)T_d},\ j_1,j_2\in[2,J], \tag{5}$$

де f_1 – розрахована основна частота, $\Phi_{1,2}$ – відповідні значення фазової характеристики для $j_{1,2}$.

Оцінка точності визначення основної частоти проводиться за формулою

$$\delta_f = f_1 - f_1 \tag{6}$$

На рис. 1, a, b наведені результати моделювання. На рис. 1, a під позначкою 1 наведений графік вихідної напруги електропостачання *u*(*t*), а під позначкою 2 – його Гільберт-образ u [*j*]. На рис. 1, b наведений результат обчислення фазової характеристики Φ [*j*] шляхом застосування дискретного перетворення Гільберта.

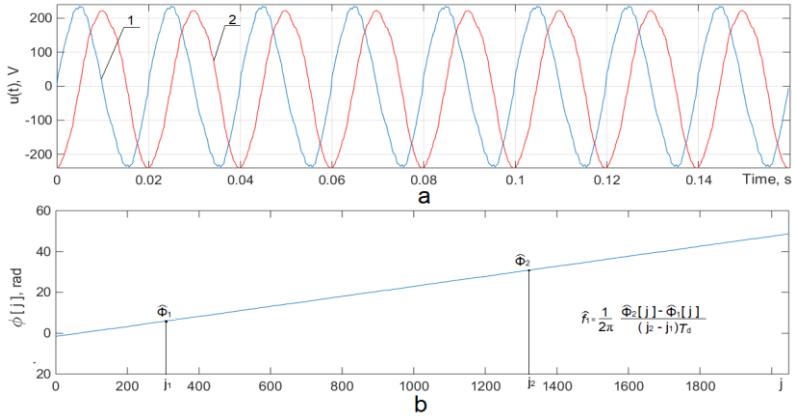


Рис. 1. Результати обчислення вихідного сигналу мережі (a, 1), його Гільберт-образу (a, 2) та фазової характеристики (b) напруги електропостачання

На отриманих графіках видно, що вихідний сигнал спотворений вищими гармоніками, а фазова характеристика змінюється у вузьких межах. Обчислення частоти основної гармоніки за наведеною фазовою характеристикою проводиться для таких даних: j_2 = 1332, j_1 = 307, $\Phi_2[j_2]$ = 31,1348 рад, $\Phi_1[j_1]$ = 5,9680 рад, тому частота основної гармоніки становить f_1 = 50,1190 Гц. Абсолютна похибка δ_f = 50,1190 – 50,12 = -10^{-3} Гц.

Розроблений програмно-алгоритмічний метод визначення основної частоти, який полягає у застосуванні фазового методу, що базується на дискретному перетворені Гільберта дає змогу оцінювати частоту основної гармоніки з абсолютною похибкою в межах ±1 мГц. Досягнутої точності достатньо для проведення моніторингу показників якості електроенергії в реальному часі.

ПОСИЛАННЯ

1. Vitalii Babak, Artur Zaporozhets, Mykhailo Kulyk, Yurii Kuts, Leonid Scherbak. Application of discrete Hilbert transform to estimate the characteristics of cyclic signals: information provision / In book: Systems, Decision and Control in Energy IV, Springer International Publishing (2023), p. 93–115. DOI: 10.1007/978-3-031-22464-5_53.
2. Babak, V., Zaporozhets, A., Kuts, Y., & Scherbak, L. (2022). Some feature of Hilbert transform and their use in energy informatics. The Problems of General Energy, 1-2(68-69), 90–96 [in Ukrainian]. https://doi.org/10.15407/pge2022.01-02.090
3. Kovtun , S., Kuts, Y., Malko, V., Fryz, M., Shcherbak, L., & Kuts, V. (2024). APPLICATION OF HILBERT TRANSFORM FOR POWER QUALITY INDICATORS MONITORING IN GENERAL PURPOSE GRIDS. System Research in Energy, (2 (77), 71–83. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.02.071.

УДК 621.311.003.13.

ДИВЕРСИФІКАЦІЯ ПРОЄКТІВ – ШЛЯХ ПІДВИЩЕННЯ ФІНАНСОВОЇ СТАБІЛЬНОСТІ ЕНЕРГОСЕРВІСНОЇ КОМПАНІЇ

М. М. Лунін

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (097) 088-81-94, e-mail: kolya_kolya_73@ukr.net

Під час підготовки цієї публікації використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення ринку енергосервісних компаній та законодавства України в цій сфері. Теоретичні міркування проілюстровано прикладом результатів діяльності реальної енергосервісної компанії.

Ключові слова: *енергосервіс, індивідуальний тепловий пункт, сонячна електростанція, енергозбереження.*

DIVERSIFICATION OF PROJECTS IS A WAY TO INCREASE THE FINANCIAL STABILITY OF AN ENERGY SERVICE COMPANY

M. Lunin

National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
37 Beresteysky Avenue, Kyiv, 03056, Ukraine
phone: (097) 088-81-94, e-mail: kolya_kolya_73@ukr.net

In solving the tasks set in this paper, the general methods of theoretical analysis of the problem were used on the basis of studying the market of energy service companies and the legislation of Ukraine in this area.

Key words*: energy service, individual heating point, solar power plant, energy saving.*

ORCID: [1]0009-0006-6983-0805; [2]0000-0001-7643-5965.

Співпраця з енергосервісними компаніями (ЕСКО) є одним з найбільш дієвих та ефективних механізмів залучення коштів у термомодернізацію об'єктів публічної сфери. Енергосервісні контракти переважно включають в себе заходи зі скорочення споживання теплової енергії. 90 % контрактів з енергосервісу − встановлення або модернізація індивідуальних теплових пунктів (ІТП) на об'єктах з централізованим опаленням. Це пов'язано передусім з інвестиційно привабливим терміном окупності таких проєктів, який становить два-три роки. Середня ціна ЕСКО-договорів становить майже 1 млн грн із середнім строком реалізації 6,5 років та фактично досягнутою середньою економією енергоресурсів 35 %. У середньому досягнута економія розподіляється 90/10, де 90 % – дохід ЕСКО, 10 % – економія бюджету [1, 2]. Однак діяльність ЕСКО тільки в цьому напрямку створює певну «сезонність» роботи компанії, коли вона отримує дохід від реалізації енергосервісу тільки під час опалювального сезону. У табл. 1 показано середньостатистичний річний грошовий потік ЕСКО внаслідок виконання робіт з монтажу теплового пункту на об'єкті комунальної власності − дитячому садку.

Таблиця 1. Надходження до компанії коштів за виконання робіт з енергосервісу

Місяць	**01**	**02**	**03**	**04**	**05**	**06**	**07**	**08**	**09**	**10**	**11**	**12**
Надходження, грн	31517,58	32270	39777,6	3097,5	0	0	0	0	0	0	36295,05	23362,53

Така «сезонність» роботи, характерна для компаній, які займаються енергосервісом виключно в системах теплопостачання, призводить до того, що дохід від своєї діяльності вони отримують тільки протягом опалювального сезону, коли на об'єктах енергосервісу відбувається споживання теплової енергії. Це створює певні виклики для фінансової стабільності таких компаній, оскільки більшу частину року вони змушені працювати з обмеженим потоком коштів. Щоб зменшити вплив «сезонності», ЕСКО можуть шукати способи диверсифікації доходів. Одним з можливих способів диверсифікації доходів може слугувати реалізація проєкту побудови сонячної електростанції (СЕС) для скорочення споживання електричної енергії на об'єкті енергосервісу. Це дасть змогу ЕСКО отримувати дохід і у весняно-осінній період, коли споживання теплової енергії відсутнє. Найпростіший розрахунок надходження грошових коштів від впровадження СЕС можна здійснити за допомогою програмного продукту PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM (PVGIS 5.3) [3]. За допомогою цього сервісу можливо розрахувати генерацію електричної енергії сонячною електростанцією заданої встановленої потужності. У табл. 2 наведено динаміку надходження коштів від реалізації проєкту впровадження СЕС встановленою потужністю 50 кВт на географічній широті міста Києва. Тариф на електричну енергію приймається 7,17 грн/кВт*год [4].

Таблиця 2. Надходження коштів від реалізації проекту впровадження СЕС, грн

Місяць	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Надходження, грн	12411	20090	34004	42381	48725	50392	50375	48380	39678	27991	12267	9442

Дані табл. 2 також свідчать про помітну «сезонність» надходження коштів, що прямо залежить від специфіки роботи сонячної електростанції. Однак у разі роботи ЕСКО одночасно як у сфері скорочення споживання теплової енергії, так і у сфері скорочення споживання електричної енергії з мережі завдяки використанню СЕС така сезонність може нівелюватися, і графік надходження коштів може вирівнюватися. Таким чином, диверсифікуючи джерела своїх доходів, ЕСКО може значно підвищити фінансову стабільність своєї роботи. За умови достатнього фінансування проєктів можливо досягти відносно рівномірного графіку надходження коштів за енергосервіс. Це може розглядатися як один з напрямів удосконалення організації роботи ЕСКО, коли основний виклик, пов'язаний із «сезонністю» одержання доходів від її функціонування практично нівелюється. SWOT-аналіз такої організації роботи енергосервісної компанії показано у табл. 3.

Таблиця 3. SWOT-аналіз удосконаленої організації роботи енергосервісної компанії

Strengths 1. Зменшення або зникнення впливу фактору «сезонності» на роботу ЕСКО 2. Збільшення грошових надходжень 3. Ширші можливості оперування коштами та залучення їх в нові проєкти 4. Потенційне підвищення тарифів на енергетичні ресурси, а отже, можливе зниження терміну окупності проєктів	**Weaknesses** 1. Значне початкове фінансування проєктів 2. Більший період окупності комплексних проектів 3. Ризик зниження попиту на реалізацію окремих складових комплексних проєктів енергосервісу
Opportunities 1. Збільшення доходів компанії за рахунок реалізації комплексних проєктів 2. Партнерство з державними програмами, зокрема з програмами кредитування 3. Зростання попиту на послуги компанії	**Threats** 1. Зростання конкуренції з іншими енергосервісними компаніями 2. Несприятливі зміни в законодавстві, регуляторній політиці тощо 3. Недосягнення планових показників економії енергоресурсів внаслідок зміни режиму роботи об'єкта енергосервісу

Також необхідно враховувати фактор розміщення об'єктів на потенційній території ведення бойових дій, що унеможливлює страхування майна, яке може постраждати. Проблему недосягнення планових показників економії енергоресурсів внаслідок зміни режиму роботи об'єктів енергосервісу може вирішити збільшення кількості ЕСКО-контрактів з об'єктами з постійним незмінним режимом роботи. До таких належать, зокрема, водоканали та лікарні. Складність енергосервісу водоканалу насамперед полягає в пошуку земельних ділянок, придатних для встановлення СЕС. Земельні ділянки слід проаналізувати з погляду їх призначення, з'ясувати наявність охоронних зон тощо. Проте цієї проблеми можна уникнути, якщо на підприємстві наявна будівля з відремонтованим дахом достатньої площі для встановлення СЕС потрібної потужності. Оскільки заклади охорони здоров'я здебільшого не мають значних вільних земельних ділянок, які можна було б використати для встановлення сонячної електростанції, для лікарень необхідно передусім з'ясувати можливість встановлення обладнання СЕС на даху, яке створює додаткове навантаження на покрівлю. Впровадження комплексних заходів з енергозбереження допоможе енергосірвісним компаніям нівелювати ризики, пов'язані із «сезонністю» їх роботи, розширити сферу послуг, що надаються, підвищити престиж компанії, а також збільшити свої доходи. Однак для цього необхідно більше фінансування й готовність закладів та установ співпрацювати в цьому напрямі.

ПОСИЛАННЯ

1. Енергосервіс − засіб досягнення економії енергоресурсів та вибір прогресивних міст. Сєвєродонецька міська рада. URL: https://www.sed-rada.gov.ua/novini-mista/energoservis-zasib-dosyagnennya-ekonomiyi-energoresursiv-ta-vibir-progresivnih-mist_27-07-2021.
2. ЕСКО-механізм працює в Одесі − КиївЕСКО. КиївЕСКО | Енергосервісні договори. URL: http://kyivesco.com/esko-mehanizm-praczyuye-v-odesi/.
3. JRC Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) − European Commission. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY.
4. Електрична енергія − НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ "КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО. prozorro.gov.ua. URL: https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2024-10-30-012900-a

УДК 621.472

АЛГОРИТМ ВИКОРИСТАННЯ МЕРЕЖЕВОГО ІНВЕРТОРА В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

В. О. Войтех

Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, м. Київ 03057, Україна,
тел.+38(044)3662571, e-mail: vvoitekh@gmail.com

Наведено алгоритм використання мережевого інвертора паралельно з автономним для збільшення потужності електричної станції, що живиться від відновлюваних джерел енергії в автономному режимі. Показано роботу мережевого інвертора за наявності мережі із забезпеченням MPPT, наведено алгоритм переходу з мережевого на автономний режим, і навпаки, а також перерозподіл потужності між автономним і мережевим інверторами за зміни навантаження.

Ключові слова: *автономний інвертор, мережевий інвертор, відновлювані джерела енергії , алгоритм, струм, MPPT, сонячна панель, навантаження.*

ALGORITHM FOR USING A GRID INVERTER IN GRID-OFF MODE WHEN POWERED BY RENEWABLE ENERGY SOURCES

V. Voitekh

Institute of Electrodynamics National Academy of Science of Ukraine,
Pr. Beresteisky 56, Kyiv, Ukraine,03057
Tel.+38(066)3105164, e-mail: vvoitekh@gmail.com

The algorithm of using a grid-on inverter in parallel with an grid-off one to increase the power of a power plant powered by renewable energy sources in grid-off mode is presented. The operation of a grid inverter in the presence of grid with MPPT support is shown, the algorithm for switching from grid-on to grid-off mode and vice versa is presented, as well as the redistribution of power between grid-off and grid-on inverters when the load changes.

Key words: *grid-off inverter, grid-on inverter, renewable energy sources, algorithm, current, MPT, solar panel, load.*

ORCID: 0000-0002-9460-4141

Досвід багаторічної війни з росією показав уразливість великих об’єктів енергогенерації (теплових, гідро, сонячних, вітрових та атомних електростанцій), а також трансформаторних підстанцій та ліній енергопостачання від ударів крилатих, балістичних ракет, керованих авіабомб та дронів, а також диверсійних та терористичних дій. Тому припинення централізованого енергопостачання, навіть довготривале, стає реальною небезпекою. Споживання електроенергії житловими будівлями, що становить майже половину загального споживання енергії [1], необхідне для підтримання нормальної життєдіяльності суспільства. З огляду на це поширеним стає бажання багатьох домовласників забезпечити себе безперервним електропостачанням, по можливості від відновлюваних джерел енергії (сонячні або вітро-), без домінування бензинових, або газових генераторів, бо існує небезпека нестачі викопних енергоресурсів під час надзвичайних ситуацій. Головною вимогою стає назька ціна та висока надійність. Здебільшого встановлене обладнання (сонячні панелі, вітрогенератори тощо) використовується тільки за відсутності мережі. Проте це дуже нераціонально, бо за наявності мережі вироблена ВДЕ електроенергія може бути використана для зменшення власного енергоспоживання, а за наявності договору з СЕС – генерації електроенергії у загальну мережу. Багато існуючих сонячних станцій вже мають встановлені мережеві інвертори, що генерують електроенергію в загальну мережу зідно з договором із СЕС, але вони не можуть працювати за відсутності мережі. Найпростішим варіантом забезпечення домогосподарства електроенергією є використання гібридних інверторів, які можуть працювати як на автономну мережу (за відсутності енергопостачання), так і на загальну замість мережевих. Водночас вартість таких інверторів набагато вища, ніж автономних або мережевих, вони мають більшу вагу і потребують спеціального підключення. Крім того, потрібно вибирати їх на повну потужність, що споживається, а мережеві інвертори відключити і в подальшому не використовувати. Одним із способів вирішення цієї проблеми є використання

за відсутності мережі автономного інвертора невеликої потужності, до якого в разі потреби підключаються мережеві інвертори, як до мережі. Структурну схему такої системи наведено на рис. 1. Всі інвертори підключені до ВДЕ, що може мати в своєму складі сонячні панелі, вітрогенератори, акумулятори, бензогенератори, які подключені між собою паралельно і мають близькі номінальні напруги. Алгоритм роботи такий [2]:

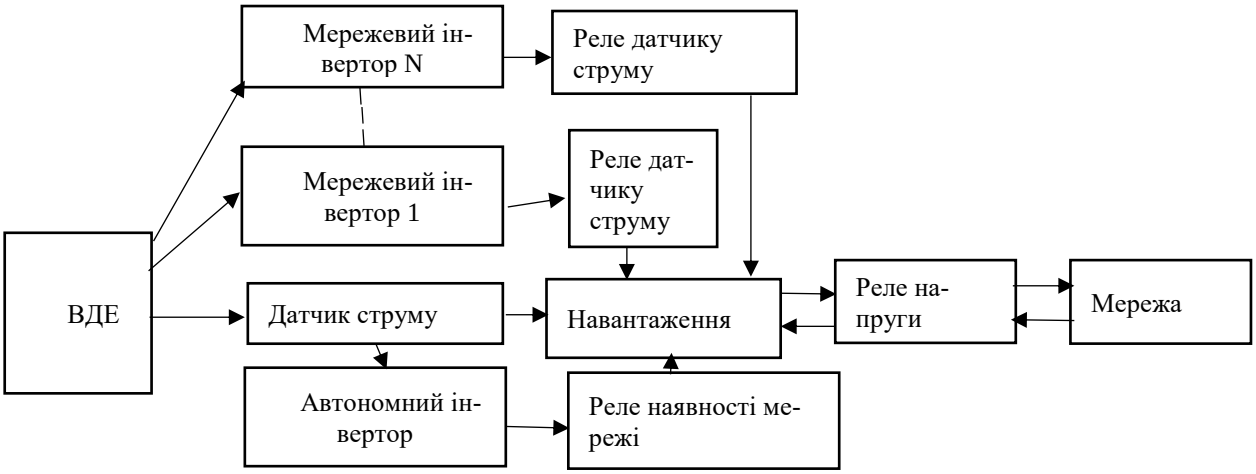


Рис. 1

За наявності загальної мережі автономний інвертор відключений від мережі за допомогою реле наявності мережі, мережеві інвертори працюють у звичайному режимі MPPT. За відсутності мережі реле напруги відключається, включається реле наявності мережі, й автономний інвертор формує автономну мережу 220В 50 Гц, до якої синхронізуються всі мережеві інвертори. Якщо струм, що споживається автономним інвертором (датчик струму), зменшується нижче Imin, то реле датчика струму відключає по черзі мережеві інвертори 1-N до того, як струм стане більше Imin. При збільшенні струму починають підключатися по черзі мережеві інвертори. Максимальна потужність в автономному режимі становитиме суму максимальних потужностей всіх інверторів. В разі появи загальної мережі автономний інвертор відключається і мережеві інвертори працюють у звичному режимі в точці MPPT. У такий спосіб вдається використати в автономному режимі мережеві інвертори, а потужність автономного інвертора зробити набагато меншою. На рис. 2 наведено фото мережевого і автономного інверторів потужністю 0,7 і 1,5 кВт відповідно. Максимальна потужність в автономному режимі становитиме $P_{\text{автмакс}} = P_{\text{авт}} + P_{\text{мер1}} + \cdots + P_{\text{мер}n}$, де $P_{\text{авт}}$ – максимальна потужність автономного інвертора, $P_{\text{мер1}} \ldots P_{\text{мер}n}$ – потужності мережевих інверторів у точці MPPT.

Рис. 2

ПОСИЛАННЯ

1. Yu, L., Qin, S., Zhang, M., Shen, C., Jiang, T., & Guan, X. (2020). A Review of Deep Reinforcement Learning for Smart Building Energy Management. arXiv preprint arXiv: 2008. 05074. https://arxiv.org/abs/2008.05074
2. Войтех В. О. Алгоритм керування гібридним інвертором дахової фотоелектричної станції з генерацією в мережу. Відновлювальна енергетика та енергоефективність у XXI столітті. Матеріали XXIV науково-практичної конференції. Київ. 18-19 травня 2023. С. 233–235.

УДК 620.9

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОГНОЗУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ З УРАХУВАННЯМ ВПЛИВУ ОБМЕЖЕНЬ НА ВИКИДИ ЗАБРУДНЮВАЛЬНИХ РЕЧОВИН В АТМОСФЕРУ

О. Є. Маляренко[1], Н. Ю. Майстренко[2]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
e-mail: malyarenlena@gmail.com; maistrenkonatalia27@ukr.net

Запропоновано удосконалений методичний підхід до визначення прогнозного попиту на ПЕР з урахуванням заміщення традиційних ПЕР на викопному паливі відновлюваними джерелами енергії з огляду на обмеження на викиди забруднювальних речовин для рівня технології.

***Ключові слова**: попит, прогнозування, паливно-енергетичні ресурси, відновлювані джерела енергії, екологічно обмежений потенціал енергозбереження.*

MATHEMATICAL MODEL FOR FORECASTING ENERGY CONSUMPTION TAKING INTO ACCOUNT THE IMPACT OF RESTRICTIONS ON POLLUTANT EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

O. Maliarenko[1], N. Maistrenko[2]

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
e-mail: malyarenlena@gmail.com; maistrenkonatalia27@ukr.net

An improved methodological approach to determining the forecast demand for renewable energy sources is proposed, taking into account the replacement of traditional fossil fuel-based renewable energy sources with renewable energy sources, taking into account restrictions on pollutant emissions for the level of technology.

***Keywords:** demand, forecasting, fuel and energy resources, renewable energy sources, environmentally limited energy saving potential.*

ORCID: [1] 0000-0001-5882-916X; [2]0009-0004-3677-2333

Оцінка прогнозного попиту на ПЕР в умовах дії воєнного стану та періоду післявоєнного відновлення економіки країни є актуальним напрямом наукового дослідження.

Науковою новизною представленої роботи є удосконалений методичний підхід та алгоритми розрахунку прогнозного попиту на енергоресурси за умови впровадження новітніх технологій, зокрема з використанням ВДЕ, та оцінки екологічного впливу забруднювальних речовин на довкілля за чинною та новітньою технологіями.

Прогнозування попиту на паливо з урахуванням обмежень на викиди забруднювальних речовин (ЗР) для рівня технології:

$$E_t^{ki} = (1-a)e_б^{ki}V_t^{ki} - \Delta A_t^{\text{екол } ki}; \quad (1)$$

де а – частка новітньої *k*-технології (зокрема з використанням ВДЕ) у структурі й-виробництва, а = 0…1;

$\Delta A_t^{\text{екол } ki}$ – екологічно обмежений потенціал енергозбереження [1], визначається за формулою:

$$\Delta A_t^{\text{екол } ki} = \Delta E_t^{\text{техн}ki} + E_t^w; \quad (2)$$

$\Delta E_t^{\text{техн}ki}$ – технічно можливий ПЕЗ за підвищення енергоефективності у *k*-технології й-виробництва, що визначається за формулою:

$$\Delta E_t^{\text{техн}ki} = \left(b_б^{ki} - b_t^{ki}\right)V_t^{ki}; \quad (3)$$

E_t^w – додаткові витрати електроенергії на функціонування очисного обладнання [2].

Для визначення екологічно обмеженого потенціала енергозбереження $\Delta A_t^{\text{екол } ki}$ запропонована удосконалена комплексна оцінка заходів зі зниження ЗР в атмосферу [3], включно з такими показниками:

1. Екологічні показники: обсяги викидів твердих частинок, SO_2, NOx, що мають відповідати нормативам ЄС згідно з Директивою 2010/75/EU (аналіз варіантів технологій та обладнання для зниження викидів).

Цей аналіз складається з таких етапів:

1.1. Вибір технологій для зниження викидів.

1.2. Порівняння обсягів викидів за технологіями з необхідним рівнем зниження викидів (складання ланцюга природоохоронних технологій).

1.3. Визначення скорочення викидів до та після впровадження природоохоронних заходів.

Граничний обсяг викиду забруднювальної речовини для спалювальної установки визначають за таким алгоритмом: вибирають значення питомого об'єму сухих димових газів (на одиницю енергії палива) vДГ (нм^3/МДж); визначають річні витрати сухих димових газів для спалювальної установки, VДГ (нм^3/рік) як суму витрат димових газів для всіх використаних палив згідно з формулою [4]:

$$VДГ = 10^6 \times \Sigma P_i \times vДГ, \quad (4)$$

де ΣP_i – сума використаних і-х видів палив;

для котлів:

$$VДГ = 10^6 (Psolid \times 0{,}358 + Pbio \times 0{,}344 + Pliq \times 0{,}285 + Pgas \times 0{,}280), \quad (5)$$

де Psolid, Pbio, Pliq, Pgas – обсяги палив твердих (вугілля, торф, ТПВ), біопалив (тріска, деревина тощо), рідких (мазут, дизельне паливо тощо), газоподібних (природний газ, біогаз, звалищний газ тощо);

для газотурбінних спалювальних установок:

$$VДГ = 106 (Pliq \times 0{,}855 + Pgas \times 0{,}840) \quad (6)$$

Визначення річного значення граничних обсягів викидів забруднювальної речовини за останній рік дії Національного плану скорочення викидів від спалювальної установки [4] як добуток витрати димових газів (VДГ), на суму добутку частки і-го палива в паливному балансі (mi) та норматив гранично допустимого викиду забруднювальної речовини (НВі) при спалюванні і-го палива визначали відповідно до формули:

$$E\ [т/рік] = 10^{-9} \times VДГ\ [м^3/рік] \times \Sigma(mi \times НВі\ [мг/м^3]) \quad (7)$$

2. Енергетичні показники: оцінка додаткових енерговитрат на функціонування очисного обладнання чи реалізацію заходу включно з витратами електроенергії на функціонування електрофільтра тощо.

3. Економічні показники: економічна оцінка варіантів очищення димових газів від викидів ЗР за показниками економічної ефективності, які наведено в [3].

ПОСИЛАННЯ

1. Майстренко Н. Ю. Методика прогнозування рівнів енергоспоживання з урахуванням екологічних, технологічних та структурних факторів в економіці на ієрархічних рівнях. Подолання екологічних ризиків та загроз для довкілля в умовах надзвичайних ситуацій. 2022: колективна монографія. Полтава – Львів: НУПП імені Юрія Кондратюка, НУ «Львівська політехніка» Дніпро: Середняк Т. К., 2022. С. 623–635. ISBN 978-617-8111-24-3 book. [Електронний ресурс]. URL: https://doi.org/10.23939/monograph2022. (дата звернення: 15.02.2025).

2. Станиціна Валентина Володимирівна. Розвиток методу повної енергоємності для визначення показників енергетичної ефективності та потенціалів енергозбереження: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.14.01 "Енерг. системи та комплекси" / Станиціна Валентина Володимирівна; НАН України, Ін-т заг. енергетики. Київ, 2016. 20 с.

3. Маляренко, О., Горський, В., Іваненко, Н., Євтухова, Т., & Матушкін, Д. (2025). Комплексна оцінка заходів зі зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу. Системні дослідження в енергетиці, (1 (81), 100-110. URL: https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.100 (дата звернення: 04.03.2025).

4. Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. [Електронний ресурс]. URL: https: https://ips.ligazakon.net/document/FN053698 (дата звернення: 04.01.2025).

УДК 628.88:697

ТЕРМІЧНЕ ОЧИЩЕННЯ ПОВІТРЯ ВІД ПАТОГЕННИХ МІКРООРГАНІЗМІВ У СИСТЕМАХ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ БУДІВЕЛЬ

Д. М. Чалаєв[1], Т. Л. Грабова[2], П. В. Гончаров[3], О. М. Гончарова[4]

[1,2]Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Булаховського, 2, Київ-164, 03164, Україна,
[3,4]Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України,
вул. Казимира Малевича, 11, Київ, 03150, Україна
[1]тел. (050) 681-68-72, e-mail: chalaev@i.ua

Розглянуто технологію термічної дезактивації аеродисперсної патогенної мікрофлори. Запропоновано енергоефективну схему термічного знезараження повітря в системах централізованої вентиляції будівель.

Ключові слова: *рекуперація теплоти, енергоспоживання, патогенні мікроорганізми, інактивація, централізована вентиляція.*

THERMAL AIR CLEANING FROM PATHOGENIC MICROORGANISMS IN CENTRALIZED BUILDING VENTILATION SYSTEMS

D. Chalaev[1], T. Grabova[2], P. Goncharov[3], O. Honcharova[4]

[1, 2]Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine,
2, Bulakhovsky, Kyiv, 03164, Ukraine,
[3, 4] E. O. Paton Electric Welding Institute of NAS of Ukraine;
11, Kazymyr Malevych St., Kyiv, 03150, Ukraine
[1]phone: (050) 681-68-72, e-mail: chalaev@i.ua

The technology of thermal deactivation of airborne pathogenic microorganisms is considered. An energy-efficient scheme for thermal air disinfection in centralized ventilation systems of buildings is proposed.

Key words: *heat recovery, energy consumption, airborne pathogenic microorganisms, inactivation, centralized ventilation.*

ORCID: [1]0000-0002-5154-4257; [2]0000-0002-5194-2474; [3]0000-0002-1980-2340; [4]0000-0002-5213-6300.

На сьогодні основними методами очищення повітря від патогенної мікрофлори визнано фотокаталітичну, плазмохімічну та термічну обробку повітря. Серед цих методів одним з найефективніших є метод термічної інактивації патогенів. Цей метод вирізняється простотою апаратного оформлення, має високу ефективність і стабільність без утворення побічних продуктів. Однак через великі енергетичні витрати, термічна дезінфекція повітря наразі не застосовується в системах централізованої вентиляції житлових і громадських будівель.

Енергетичні витрати на термічну обробку залежать від температури, до якої необхідно нагріти повітря, і можуть бути значно знижені шляхом використання рекуперації теплоти від вже нагрітого дезінфікованого повітря до холодного повітря, що надходить на дезінфекцію. Така рекуперація теплоти дозволяє заощадити значну частину енергії, витраченої на нагрів. Рекуперативний теплообмінник також знижує температуру гарячого дезінфікованого повітря майже до температури навколишнього середовища.

Температурна інактивація патогенних мікроорганізмів є предметом активних наукових досліджень. Нещодавні дослідження показали, що високотемпературна короткочасна термічна обробка знижує інфекційність вірусів як мінімум на 3-4 порядки [1, 2]. Ефективність термічної інактивації вірусних аерозолів залежить в основному від двох параметрів: максимальної температури нагріву та періоду перебування вірусу в такому середовищі. Рекомендовані значення цих параметрів, а також ефективність інактивації повинні визначатися експериментально. За результатами попередніх досліджень можна зробити висновок, що необхідна температура, ймовірно, має бути в діапазоні 60–120 °C [2, 3].

Схема пристрою термічної обробки повітря з рекуперацією теплоти показана на рис. 1. Вхідний потік повітря з температурою t_1 проходить через фільтр грубого очищення 1. Далі він потрапляє в нагрівальний канал рекуперативного теплообмінника 2, де підігрівається до температури t_2, після чого спрямовується до нагрівача 3 й доводиться

до заданої температури t_3, необхідної для інактивації патогенної мікрофлори. Нагріте дезінфіковане повітря надходить до охолоджувального каналу рекуперативного теплообмінника 2 й охолоджується до температури t_4, віддаючи теплоту вхідному потоку повітря. Після проходження через рекуперативний теплообмінник повітря при необхідності доохолоджується в теплообміннику 4 і подається до приміщення.

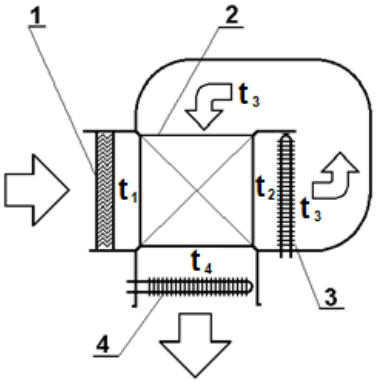


Рис. 1. Схема пристрою термічної дезінфекції повітря:
1 – фільтр грубого очищення повітря;
2 – перехресно-точний рекуперативний теплообмінник;
3 – нагрівач повітря;
4 – охолоджувач повітря

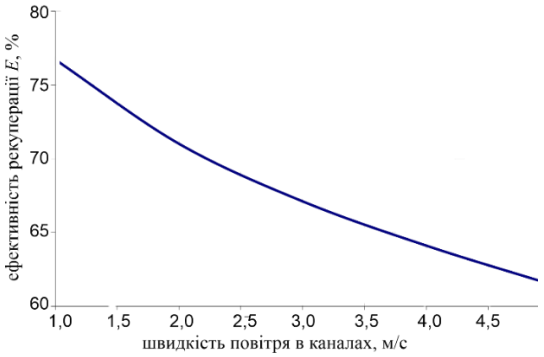


Рис. 2. Залежність температурної ефективності перехресно-точного рекуператора від швидкості повітря в каналах

Енергоспоживання пристрою для термічної дезінфекції повітря залежить від рівня максимальної температури нагріву повітря та ефективності рекуперативного теплообмінника.

Теплообмінний блок перехресно-точного рекуператора був виготовлений з пластин зі стільникового полікарбонату з відстанню між пластинами 4 мм. Конструкція теплообмінного блока герметична й виключає перетікання з одного повітряного потоку в інший [4]. Графічна залежність температурної ефективності рекуператора від швидкості руху повітря при рівних масових витратах у припливному та витяжному каналах наведена на рис. 2.
Витрата теплової енергії на пряме нагрівання повітря, що подається в модуль термічної дезінфекції, становить:

$$Q_{нагр} = c_p \cdot G \cdot (t_3 - t_1) \cdot$$

У разі рекуперації теплоти витрата енергії на нагрівання повітря становить:

$$Q^P_{нагр} = c_p \cdot G \cdot (t_3 - t_2) = c_p \cdot G \cdot \left[t_3 - t_1 - E \cdot (t_3 - t_1)\right],$$

де $E = (t_2 - t_1)/(t_3 - t_1)$ – температурна ефективність рекуператора, величина якої залежить від швидкості руху повітря в каналах (рис. 2); G – масова витрата повітря; c_p – питома тепломісткість повітря.

За температури дезінфекції 100 °С питоме енергоспоживання системи термічного знезараження повітря не перевищує 25 кДж на 1 м^3 повітря, що можна порівняти з витратою теплової енергії на повітряне опалення будівлі. Таким чином, в опалювальний період року система термічного знезараження повітря може одночасно виконувати функцію повітряного опалення приміщень будівлі.

ПОСИЛАННЯ

1. N. Soni, D. Sharma, V. Nimesh, V. Mahendra Reddy, Solar energy assisted thermal treatment model to decontaminate airborne viruses in hospital, Thermal Science and Engineering Progress. 36, (2022), 101516. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101516

2. J. Burton, H. Love, K. Richards, C. Burton, S. Summers, J. Pitman, L. Easterbrook, K. Davies, P. Spencer, M. Killip, P. Cane, The effect of heat-treatment on SARS-CoV2 viability and detection. Journal of Virological Methods. 290 (2021), 114087. https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2021.114087

3. G. Kampf, A. Voss, S. Scheithauer, Inactivation of coronaviruses by heat. Journal of Hospital Infection. 105 (2020), 348–349. https://doi.org/10.1016/j.jhin.2020.03.025

4. D.Chalaev, N. Dabizha, N. Malashchuk. Experimental investigation of heat transfer in a recuperator of a convective dryer. SWorldJournal 08-01 (2021), 42–49. https://doi.org/10.30888/2663-5712.2021-08-01-058

УДК 621.311.243 : 628.165

ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕННИХ ТА МІСЯЧНИХ ОБСЯГІВ ВИРОБНИЦТВА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ З УРАХУВАННЯМ ДОБОВОЇ ТА СЕЗОННОЇ ЦИКЛІЧНОСТІ В АЗОВО-ЧОРНОМОРСЬКОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ

І. Л. Мазуренко

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (066) 100-25-71, e-mail: irynalmazurenko@gmail.com

Отримано статистичні оцінки очікуваних денних та місячних обсягів виробництва електроенергії фотоелектричною станцією з урахуванням метеорологічних умов Азово-Чорноморського регіону України.

Ключові слова: *фотоелектрична станція, обсяги виробництва електроенергії, варіабельність, середнє значення, середньоквадратичне відхилення, тривалість генерування.*

RESEARCH OF DAILY AND MONTHLY VOLUMES OF ELECTRICITY PRODUCTION BY A PHOTOELECTRIC PLANT TAKING INTO ACCOUNT DAILY AND SEASONAL CYCLICITY IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF UKRAINE

I. Mazurenko

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna Str., Kyiv, 03143, Ukraine,
phone: (066) 100-25-71, e-mail: irynalmazurenko@gmail.com

Statistical estimates of the expected daily and monthly volumes of electricity production by solar power plants were obtained, taking into account the meteorological conditions of the Azov-Black Sea region of Ukraine.

Key words: *photovoltaic plant, electricity production volumes, variability, average value, standard deviation, generation duration.*

ORCID: 0000-0002-0146-7396

Україна бере участь у реалізації європейської програми «2x40 GWGreenHydrogenInitiative» [1], в якій планується спорудження на території України 10 ГВт потужностей електролізерів для виробництва 1,65 млн т на рік зеленого водню з використанням відновлюваних джерел енергії в Азово-Чорноморському регіоні, якому притаманні найбільші значення потенціалу енергії вітру та сонячної радіації в країні. Один з альтернативних варіантів функціонування електролізерів полягає у використанні опрісненої морської води. Проте використання технологій опріснення води на території регіону не обмежується лише реалізацією програми електролізерного виробництва зеленого водню, але й обумовлено необхідністю підготовки прісної води як для промисловості, так і приватного сектору економіки, для ведення сільськогосподарських робіт та знесолення шахтних вод [2]. Тому актуальним є дослідження обсягів виробництва фотоелектричними станціями (ФЕС) електроенергії з метою досягнення максимальної інтеграції її в технологічні схеми опріснення води в кліматичних умовах Азово-Чорноморського регіону України з урахуванням стохастичної зміни генерованої потужності, зумовленої впливом хмарності, температури повітря та швидкості вітру в місці розташування ФЕС [3].

Розрахункові дослідження виконано для умовної станції зі встановленою потужністю фотоелектричних модулів 1 кВт з метою можливості трансформування до проєктних показників реальної ФЕС шляхом масштабування. Для отримання статистично стійких оцінок використано 16-річний інтервал часу з 2005 до 2020 року та метеорологічну базу даних SARAH2 з погодинною інформацією про щільність сонячного випромінювання, температуру навколишнього середовища та швидкість вітру в центральній частині Азово-Чорноморського регіону України. Обсяг виробництва електроенергії визначається параметрами денного тренду потужності й тривалістю генерування у зазначених інтервалах часу.

У цій роботі проаналізовано денні та місячні значення обсягів виробництва. Показники денного обсягу виробництва електроенергії ФЕС для різних місяців року наведено в табл. 1. У зимовий період процес виробництва електроенергії характеризується значною варіабельністю, коли середньоквадратичне відхилення σ сягає рівня середнього значення, що зумовлено наявністю хмарності в цей період часу. Обсяг виробництва електроенергії в зимовий сезон майже в три рази менший, ніж у літні місяці. Зокрема, середнє значення денного обсягу виробництва електроенергії $\overline{E}$ у серпні становить близько 4,8 кВт·год/день, а в січні – лише 1,4 кВт·год/день. Загальна тривалість генерування електроенергії T_m у серпні становить 372 год, у квітні – 360 год, у жовтні – 300 год, у січні – 248 год.

Таблиця 1. Показники денного виробництва електроенергії ФЕС по місяцях року

Показники	Місяці											
	січень	лютий	березень	квітень	травень	червень	липень	серпень	вересень	жовтень	листопад	грудень
$\overline{E}$, кВт·год/день	1.407	2.059	3.443	4.251	4.506	4.488	4.604	4.793	4.257	3.171	1.928	1.275
σ , кВт·год/день	1.36	1.754	1.876	1.745	1.329	1.13	0.979	1.063	1.472	1.783	1.554	1.255
T_m, год	248	254	310	360	372	390	403	372	330	300	269	248

Отримані функціональні залежності ймовірнісної забезпеченості денного обсягу виробництва електроенергії на місячному інтервалі часу для найбільш репрезентативних місяців відповідних сезонів року представлено на рис. 1. Максимально можливе значення обсягу денного виробництва спостерігається в квітні. Сумарна тривалість генерування в серпні середнього денного значення обсягу виробництва і більше очікується протягом 20 днів, у квітні – 17 днів, у жовтні – 16 днів, у січні – 10 днів.

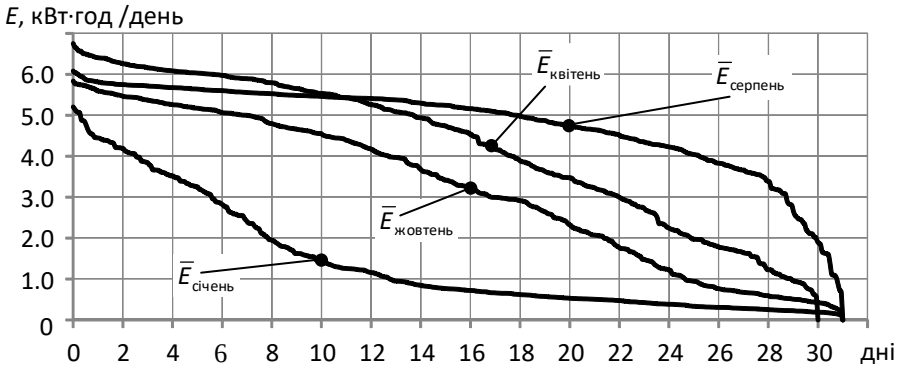


Рис. 1. Імовірнісна забезпеченість денного обсягу виробництва електроенергії на місячних інтервалах часу

Як видно з рис. 1, виробництво денного обсягу електроенергії більше 4 кВт·год/день спостерігатиметься в серпні протягом 25 днів, у квітні – 18 днів, у жовтні – 12 днів, у січні – 2 дні. Досягнення рівня обсягу денного виробництва більше 5 кВт·год/день спостерігатиметься в серпні протягом 18 днів, у квітні – 13 днів, у жовтні – 6 днів, у січні – меньше одного дня.

Досяжне річне значення коефіцієнта використання встановленої потужності ФЕС, за умови повної інтеграції генерованої енергії в технологічні схеми опріснення води, можна очікувати в діапазоні (0,128 – 0.148) в.о.

Отримані кількісні результати можуть використовуватись при виконанні техніко-економічних обґрунтувань інтеграції енергії ФЕС у технологічні схеми опріснення води в Азово-Чорноморському регіоні України і в подальшому уточнюватись на етапі робочого проєктування шляхом застосування конкретних вхідних даних.

ПОСИЛАННЯ

1. Ad van Wijk, Jorgo Chatzimarkakisr. Green Hydrogen for a European Green Deal A 2x40 GW Initiative. Brussels: Hydrogen Europe, 2020. 40 p.

2. Хорольський А. О., Лапко В. В., Саллі В. С., Мамайкін О. Р. Вибір технології демінералізації стічних вод, як складової технологічних потоків вугільних шахт. Збірник наукових праць НГУ. 2020. № 63. С. 61–73.

3. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина І. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі: підручник. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. 150 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/58361.

УДК 621.311.243 : 628.165

ОСОБЛИВОСТІ СТАТИСТИЧНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ГЕНЕРУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ ЯК ЦИКЛІЧНОГО ВИПАДКОВОГО ПРОЦЕСУ

Р. М. Сисак

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (050) 381-06-49, e-mail: sysak_r@yahoo.com

Представлено вирази для отримання в добовому та сезонному розрізі статистичних оцінок параметрів процесу генерування потужності ФЕС як циклічного випадкового процесу. Результати роботи можуть використовуватись для техніко-економічної оптимізації інтегрування енергії ФЕС в технологічні схеми опріснення води.

Ключові слова: *фотоелектрична станція, циклічний випадковий процес, часовий ряд, статистичні дані, імовірнісні характеристики, опріснення води*

PECULIARITIES OF STATISTICAL ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC PLANT POWER GENERATION DATA AS A CYCLICAL RANDOM PROCESS

R. Sysak

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna Str., Kyiv, 03143, Ukraine,
phone: (050) 381-06-49, e-mail: sysak_r@yahoo.com

Expressions are presented for obtaining daily and seasonal statistical estimates of the parameters of PVP power generation as a cyclical random process. The results of the study can be used for technical and economic optimization of integrating PVP power into water desalination technological schemes.

Key words*: photovoltaic plant, cyclical random process, time series, statistical data, probabilistic characteristics, water desalination*

ORCID: 0000-0003-4474-4776

Одним із перспективних напрямів використання сонячної енергії, який активно розвивається останніми десятиліттями, є опріснення морської води з метою отримання питної води або виробництва зеленого водню. Це зумовлено тим, що вартість викопних видів палива невпинно зростає, тоді як відновлювані технології навпаки стають все більш економічно привабливими. У сучасних умовах опріснення води на основі енергії відновлюваних джерел може забезпечити сталий і економічно ефективний спосіб отримання чистої води [1]. В Україні найбільший потенціал для впровадження цих технологій має Азово-Чорноморський регіон [2].

Інтеграція електроенергії ФЕС у технологічні схеми опріснення води пов'язана з проведенням детальної техніко-економічної оптимізації всього технологічного комплексу. Суттєвим обмеженням при цьому є потреба неперервного енергопостачання, особливо при використанні мембранних технологій [3], що зумовлює необхідність узгодження в часі процесів споживання та генерування електроенергії. Тому дослідження особливостей процесу генерування потужності ФЕС для кожного моменту часу є важливою і актуальною задачею, розв'язання якої дає можливість максимально ефективно поєднувати різні види енергії для забезпечення сталого графіка енергопостачання опріснювального заводу.

Зміна генерованої потужності ФЕС зумовлена низкою природних факторів, які є стохастичними за своєю природою, але одночасно залежать від часу доби й сезону [4]. Тому процес генерування потужності ФЕС може розглядатися як циклічний випадковий процес. Методи аналізу таких процесів розглянуті, наприклад, у [5, 6].

Статистичні дані, необхідні для досліджень, було отримано з системи Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) Європейської Комісії [7], яка містить інформацію про інтенсивність сонячного опромінення, температуру повітря і швидкість вітру на 10-метровій висоті над земною поверхнею протягом 16 років (з 2005 до 2020 року включно), а також реалізує погодинні розрахунки генерованої потужності ФЕС заданої конфігурації з урахуванням

температури навколишнього середовища та охолодження вітром. У межах цієї роботи встановлену потужність ФЕС було вибрано на рівні 1 кВт, а приведені втрати – 10 %. Отримані дані представлено у вигляді рядів:

$$P_{s;i}(t_j), \quad j=1, 2, ..., N_i, \quad i=1, 2, ..., Y, \tag{1}$$

де $P_{s;i}(t_j)$– потужність ФЕС в момент t_j i-ї реалізації, Y – кількість реалізацій, N_i – кількість значень у реалізації.

Для врахування сезонної та добової циклічності процесу часові ряди (1) переформуємо у вигляді

$$P_{s;m,h}(t_j), \quad j=1, 2, ..., K_m, \quad m=1, 2, ..., 12, \quad h=1, 2, ..., 24, \tag{2}$$

де $P_{s;m,h}(t_j)$– ряд, що містить значення потужності ФЕС лише для певного місяця m і години h, K_m – кількість днів відповідного місяця за весь період спостережень.

Тоді денний тренд випадкової функції генерування потужності ФЕС для місяця m визначимо так:

$$\overline{P}_{s;m}(h)=\frac{1}{K_m}\sum_{j=1}^{K_m}P_{s;m,h}(t_j), \quad m=1, 2, ..., 12, \quad h=1, 2, ..., 24. \tag{3}$$

Величина $\overline{P}_{s;m}(h)$ характеризує центр розсіювання випадкового процесу генерування потужності ФЕС у h-ту годину m-го місяця року. Розсіювання цього процесу відносно центра характеризується величиною:

$$\sigma^2_{ps;m}(h)=\frac{1}{K_m-1}\sum_{j=1}^{K_m}\left(P_{s;m,h}(t_j)-\overline{P}_{s;m}(h)\right)^2, \quad m=1, 2, ..., 12, \quad h=1, 2, ..., 24. \tag{4}$$

Характеристики (3) і (4) описують імовірнісний закон розподілу досліджуваного процесу в межах енергетичної теорії. Крім цього, для інтеграції електроенергії ФЕС у технологічні схеми опріснення води важливо знати статистичні характеристики ймовірнісної забезпеченості досяжних рівнів генерованої потужності [8], які розраховуються з ряду (2) окремо для кожної години h кожного місяця m.

Таким чином, процес генерування потужності ФЕС представлено в добовому та сезонному розрізі як сукупність випадкових функцій у вигляді добових трендів та їх стохастичних складових, а також отримано ймовірнісні рівні забезпеченості потужності ФЕС. Розрахункові дослідження виконано для умовної ФЕС зі встановленою потужністю фотоелектричних модулів 1 кВт, що дозволяє легке масштабування отриманих чисельних результатів для ФЕС довільної заданої потужності. Для отримання статистично стійких оцінок використано погодинні історичні дані на 16-річному інтервалі з 2005 до 2020 року з метеорологічної бази даних PVGIS. Отримані кількісні результати можуть використовуватись для техніко-економічної оптимізації інтегрування енергії ФЕС у технологічні схеми опріснення води в Азово-Чорноморському регіоні України.

ПОСИЛАННЯ

1. Bundschuh J., Kaczmarczyk M., Ghaffour N., Tomaszewska B. State-of-the-art of renewable energy sources used in water desalination: Present and future prospects. Desalination. 2021. 508. 15 July. 115035. URL: https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115035.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України. Київ: Інтерсервіс, 2020. 82 с.
3. Ali A., Tufa R. A., Macedonio F., Curcio E., Drioli E. Membrane technology in renewable-energy-driven desalination. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 81. P. 1–21. URL: https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.047.
4. Гаєвський О. Ю. Фотоенергетика. Частина І. Сонячна радіація і фотоелектричні модулі: підручник. Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, 2023. 150 с. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/58361.
5. Марченко Б. Г. Лінійні періодичні процеси. Праці Ін-ту електродинаміки НАН України. Електротехніка. К.: ІЕД НАН України. 1999. С. 172–185.
6. Марченко Б. Г., Приймак М. В. Побудова моделі та аналіз стохастично періодичних навантажень енергосистем. Праці Ін-ту електродинаміки. К.: ІЕД НАН України. 1999. Вип. 1. С. 129–134.
7. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en (дата звернення: 03.03.2025).
8. Васько П. Ф., Мазуренко І. Л. Аналіз імовірнісних характеристик вітроелектричних станцій як джерела енергії для опріснення морської води в Азово-Чорноморському регіоні України. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. № 4. С. 42–56. URL: https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.04.

УДК 697.7, 621.313

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ СЕЗОННИХ ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРІВ З КОМПЛЕКСНИМ ОБҐРУНТУВАННЯМ ЇХ ЕКОНОМІЧНОЇ ДОЦІЛЬНОСТІ

О. М. Попович[1], І. В. Головань[2]

[1, 2]Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143,
[1, 2]Інститут електродинаміки НАН України, просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: popovich1955@ukr.net

Робота присвячена розробці й використанню комплексної математичної моделі систем з сезонним акумулюванням теплової енергії, зокрема з можливістю кристалізації теплоносія.

Ключові слова: *сезонний тепловий акумулятор, кристалізація води, комплексна математична модель, критерії енергетичної та ресурсної ефективності.*

STUDY OF THE OPERATING MODES OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS OF SEASONAL THERMAL ACCUMULATORS WITH A COMPREHENSIVE JUSTIFICATION OF THEIR ECONOMIC FEASIBILITY.

O. Popovych[1], I. Golovan[2]

[1, 2]Institute of Electrodynamics, National Academy of Science of Ukraine, 56 Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03057, e-mail: popovich1955@ukr.net
[1, 2]Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine, Metrolohichna street., 50 Kyiv, Ukraine, 03143

The paper is devoted to the development and use of a comprehensive mathematical model of systems with seasonal thermal energy accumulation, including the possibility of crystallisation of the coolant.

Keywords: *seasonal heat accumulator, water crystallisation, complex mathematical model, energy and resource efficiency criteria.*

ORCID: [1]0000-0002-9238-5782; [2]0000-0002-5250-6981

Циклічні зміни температури навколишнього середовища створюють можливість ефективного застосування сезонних теплових акумуляторів (ТА). Спочатку це були акумулятори холоду для зберігання продуктів. Розвиток електромеханічних систем, зокрема теплових насосів, створив умови створення акумуляторів тепла на потребу опалення. Крім того, високотемпературні ТА з теплоносієм у вигляді розплавів солі або піску застосовують для зберігання енергії відновлюваних джерел з наступним перетворенням її на електричну. Основна проблематика застосування ТА пов'язана з їхньою вартістю й ККД. Обґрунтування доцільності сезонних ТА потребує створення й застосування розвинутих математичних і програмних засобів комплексного аналізу процесів у системах з ТА.

У роботах [1, 2] розроблено, програмно реалізовано й апробовано комплексну математичну модель для проєктного синтезу конструктивних і режимних параметрів систем відновлюваної енергетики з сезонним акумулюванням теплової енергії, зокрема з можливістю кристалізації теплоносія. Застосовано критерій ефективності цих систем як відношення доходу від продажу одиниці енергії, направленої на акумулювання, до вартості теплоізоляційного матеріалу. Математична модель забезпечує визначення інтегральної величини цього критерію за сезонний цикл роботи ТА з урахуванням сумісного впливу електромеханічного й теплотехнічного обладнання на ефективність системи. Виконано порівняльні дослідження ефективності систем ТА за варіювання їх форми й обсягів енергії. Показано, що застосування ТА з водою в рідкому стані може збільшити енергетичну ефективність системи до двох разів, порівняно з атмосферним тепловим насосом. Варіант з кристалізацією програє варіанту з водою у рідкому стані за показниками енергетичної й ресурсної ефективності, але потребує меншого розміру ТА. Для варіанта з кристалізацією води досліджено синергетичний ефект отримання очищеної розморожуванням питної води, показано можливість покращення при цьому показників ресурсної ефективності у 2,5 … 8,5 разів, що може знижувати термін окупності витрат на теплову ізоляцію до кількох місяців.

ПОСИЛАННЯ

1. Попович О. М. Моделювання систем з сезонними тепловими акумуляторами відновлюваної енергетики. Відновлювана енергетика. 2023. № 3. С. 115–126. DOI:10.36296/1819-8058.2023.3(74)115-126.

2. Попович О. М., Головань І. В. Порівняльне дослідження енергетичних систем з сезонними тепловими акумуляторами із кристалізацією теплоносія. Відновлювана енергетика. 2024. № 4. С. 36–45. DOI: 10.36296/1819-8058.2024.4(79).36-45

УДК 621.311.25

РОЗРОБКА ГІБРИДНОГО ТЕПЛОВОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА ТА АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЙОГО РОБОТИ

С. Й. Мисак., С. П. Шаповал

Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С.Бандери, 12 , м. Львів , 79013, Україна,
тел.: (098) 519-73-07, e-mail: s.mysak750@gmail.com

Дослідження присвячене визначенню ефективності гібридних теплових фотоелектричних геліоколекторів (ГТФГК), які поєднують функції теплових геліоколекторів і фотоелектричних панелей

Ключові слова: *гібридний тепловий фотоелектричний геліоколектор, ефективність, фотоелемент, тепловий акумулятор, сонячна енергія, відновлювані джерела енергії*

DEVELOPMENT OF A HYBRID THERMAL PHOTOVOLTAIC SOLAR COLLECTOR AND ANALYSIS OF ITS EFFICIENCY

S. Mysak, S. Shapoval

Lviv Polytechnic National University,
12, S. Bandera St., Lviv, 79013, Ukraine,
tel.: (098) 519-73-07, e-mail: s.mysak750@gmail.com

The study is devoted to the determination of the efficiency of hybrid thermal photovoltaic solar collectors (HTPSC), which combine the functions of thermal solar collectors and photovoltaic panels

Keywords*: hybrid thermal photovoltaic solar collector, efficiency, photocell, thermal accumulator, solar energy, renewable energy sources*

ORCID: [1]0000-0003-2064-7015; [2]0000-0003-4985-0930

Основною науковою проблемою, що розглядається у дослідженні, є підвищення ефективності перетворення сонячної енергії на теплову та електричну за допомогою гібридних теплових фотоелектричних геліоколекторів (ГТФГК). Завдання полягає в розробці оптимальних конструктивних і технологічних рішень, які забезпечать максимальне поглинання сонячної енергії та мінімізують енергетичні втрати. Це передбачає об'єднання теплових геліоколекторів і електричних сонячних панелей в єдину систему, застосування нових, сучасних матеріалів, оптимізацію теплоізоляції та теплообміну завдяки вдосконаленню конструкції ГТФГК. Розв'язання цієї проблеми сприятиме ефективнішому використанню чистої енергії з відновлюваних джерел, зменшенню викидів парникових газів завдяки скороченню споживання викопного палива, зробить такі системи та отримання з них енергії дешевшими та доступнішими для споживачів.

Аналіз останніх досліджень показав, що зміни клімату, які відбуваються у глобальному масштабі, а також прогнози провідних кліматичних організацій [1] наголошують на нагальній потребі скорочення шкідливих викидів і зменшення залежності від традиційних джерел енергії. Це змушує світове співтовариство впроваджувати заходи [2], спрямовані на екологічну стійкість і розвиток чистих технологій. Перехід на відновлювані джерела енергії є не просто бажаним, а критично необхідним для забезпечення збереження природних ресурсів та створення безпечного енергетичного майбутнього для наступних поколінь [3].

Сучасні наукові розробки демонструють значний прогрес у сфері гібридних сонячних систем, які перевершують традиційні фотоелектричні та теплові установки за коефіцієнтом корисної дії [4, 5]. Вивчення наукової літератури, присвяченої вдосконаленню конструктивних рішень та створенню інтегрованих енергетичних комплексів [6, 7], підтверджує перспективність комбінованих технологій у сонячній енергетиці [8]. Гібридні сонячні колектори поєднують дві принципово важливі технології – фотоелектричну генерацію електроенергії [9, 10] та теплове перетворення сонячної енергії [11]. Це дозволяє досягти ефективного використання енергетичного потенціалу сонця, оптимізувати процеси поглинання випромінювання та мінімізувати енергетичні втрати.

Проте існує певне обмеження таких систем: як відомо, від 80 до 90 % сонячної енергії поглинається поверхнею сонячних електричних панелей, але лише 10–15 % цієї поглинутої енергії перетворюється на електричну, а 5–10 %

– на теплову. Це свідчить про значний невикористаний потенціал, який може бути реалізований використанням інноваційних матеріалів, удосконаленням конструктивних та технологічних рішень з метою підвищення ефективності теплообміну [12, 13]. Запропонованим підходом є впровадження спеціальних концентраторів, які посилюють тепловий вихід і сприяють ефективнішому використанню сонячної енергії [14].

Гібридні геліоколектори відіграють провідну роль у розвитку сонячної енергетики як ключового компонента у стратегії переходу на відновлювані джерела енергії. Вони сприяють стабілізації енергопостачання [15] та підвищенню адаптивності енергосистем до сезонних змін у попиті [16], зменшенню споживання викопного палива, зниженню рівня викидів CO_2 [17]. Розробка та впровадження новітніх інтегрованих гібридних сонячних колекторів, які ефективно перетворюють сонячну енергію як у теплову [18, 19], так і в електричну форму, є стратегічно важливим напрямом досліджень, що забезпечить можливість використання таких систем у сучасних енергоефективних будівлях та сприятиме вирішенню наявних кліматичних проблем.

У дослідженні розглянуто функціонування гібридної енергетичної системи (ГСЕ) на основі гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК). Принципову схему цієї системи наведено на рис. 1.

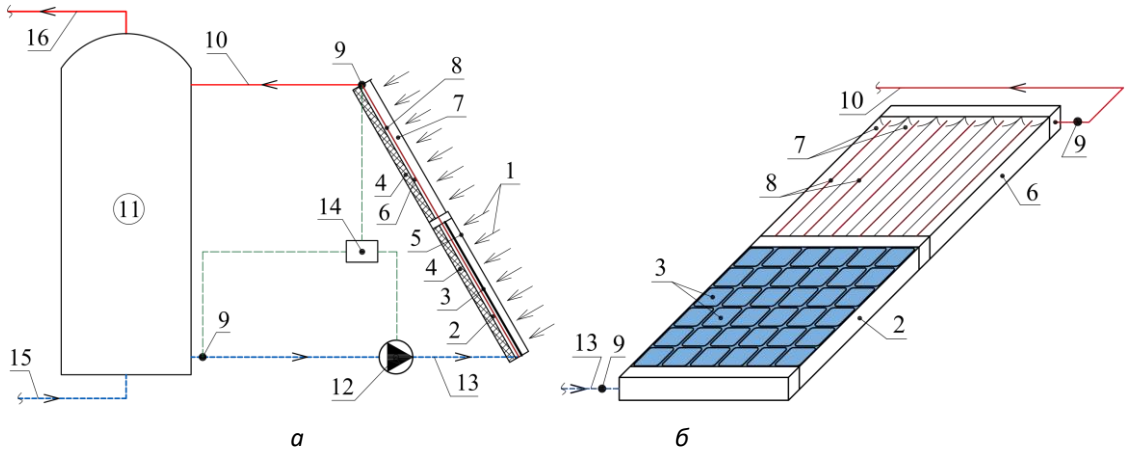


Рис. 1. Принципова схема ГСЕ з ГТФГК: а – вигляд збоку, б – вигляд зверху
1 – сонячне випромінювання; 2 – теплофотоелектричний модуль гібридного теплового фотоелектричного геліоколектора (ГТФГК); 3 – фотоелементи; 4 – утеплювач; 5 – світлопрозоре захисне покриття; 6 – тепловий модуль ГТФГК; 7 – концентратори сонячного випромінювання; 8 – теплопоглинальні трубки; 9 – датчики температури; 10, 13 – трубопроводи для нагрітого та охолодженого теплоносія; 11 – тепловий акумулятор (ТА); 12 – циркуляційний насос; 14 – контролер управління системою; 15, 16 – трубопроводи нагрітого та охолодженого теплоносія в системі споживача

Графіки теплової ефективності ГТФГК $\eta_{т,\ ГТФГК}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині $I_т$, Вт/м^2, а також кута нахилу ГТФГК до горизонту β, град, побудовані на рис. 2.

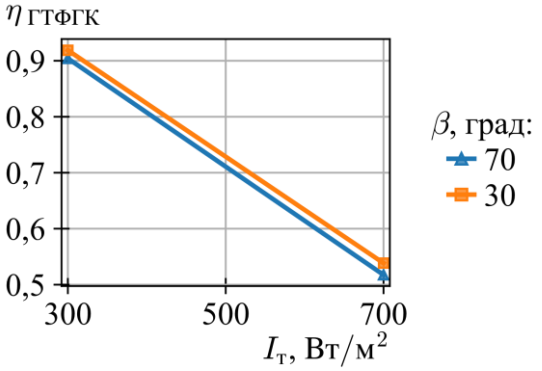


Рис. 2. Теплова ефективність ГТФГК $\eta_{m,\ ГТФГК}$ залежно від інтенсивності сонячного випромінювання в його площині I_m та кута нахилу ГТФГК до горизонту в при α = 30°, G = 0,01 кг/(м^2·с)

З рис. 2 випливає, що зміна кута нахилу ГТФГК до горизонту β не сильно впливає на його теплову ефективність $\eta_{т,\ ГТФГК}$, зменшуючи її на 0,02 при збільшенні β з 30˚ до 70˚, а збільшення інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_т$ з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 зменшує $\eta_{т,\ ГТФГК}$ на 42 %.

На рис. 3 представлено графіки зміни теплової ефективності ГТФГК $\eta_{т,\ ГТФГК}$ залежності від кута нахилу його до горизонту β, град, та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_т$, Вт/м^2.

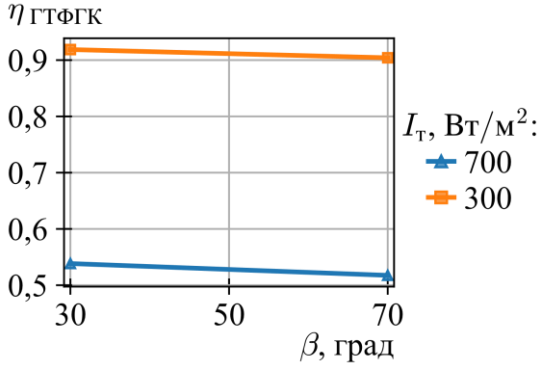


Рис. 3. Зміна теплової ефективності ГТФГК $\eta_{m,\ ГТФГК}$ від кута нахилу його до горизонту в та інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК I_m при α = 30˚, G = 0,01 кг/(м^2·с)

На основі аналізу експериментальних даних, зображених на рис. 3, виявлено зменшення на 0,02 теплової ефективності ГТФГК $\eta_{т,\ ГТФГК}$ при збільшенні кута його нахилу до горизонту β з 30˚ до 70˚, при цьому зростання інтенсивності сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_т$ з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 зменшує $\eta_{т,\ ГТФГК}$ на 42 %.

Для азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α = 30˚ та питомої масової витрати теплоносія в ньому G = 0,01 кг/(м^2·с) збільшення кута нахилу ГТФГК до горизонту β з 30˚ до 70˚ призводить до зміни теплових його ефективностей $\eta_{т,\ ГТФГК}$ та $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ на 2–4 % та електричної ефективності фотоелементів $\eta_{ФЕ}$ лише на 1 % для інтенсивностей сонячного випромінювання в його площині $I_т$ рівних 300 Вт/м^2 та 700 Вт/м^2 відповідно. При збільшенні $I_т$ з 300 Вт/м^2 до 700 Вт/м^2 $\eta_{т,\ ГТФГК}$ та $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ зменшуються в середньому на 42 %, а $\eta_{ФЕ}$, навпаки, збільшується на 2–4 % для β = 30˚ і β = 70˚. Отже, інтенсивність сонячного випромінювання в площині ГТФГК $I_т$ є домінуючим фактором впливу на $\eta_{т,\ ГТФГК}$, $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ та $\eta_{ФЕ}$.

Для β = 30˚ та $I_т$ = 300 Вт/м^2 ефективності $\eta_{т,\ ГТФГК}$, $\eta_{ФЕ}$, для α = 30˚ і α = 70˚ не залежать від зміни питомої маси теплоносія в контурі ГТФГК G з 0,01 кг/(м^2·с) до 0,02 кг/(м^2·с). При цій зміні G і α = 70˚ $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ також не змінюється, а для α = 30˚ $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ на 5 % зростає. Однак при збільшенні α з 30˚ до 70˚ $\eta_{т,\ ГТФГК}$, $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ та $\eta_{ФЕ}$ також збільшуються на 42 %, на 42–49 % та в 2 рази відповідно. Отже, на відміну від питомої масової витрати G зміна азимутального кута відхилення нормалі до ГТФГК від місцевого меридіана α значно впливає на зміну $\eta_{т,\ ГТФГК}$, $\eta_{ГСЕ\ з\ ГТФГК}$ та $\eta_{ФЕ}$.

Таким чином, дослідження демонструє високий потенціал гібридних геліоколекторів у контексті підвищення ефективності сонячної енергетики та її інтеграції у сучасні енергетичні системи.

ПОСИЛАННЯ

1. Global Warming of 1.5°C [Electronic resource] : Summary for Policymakers. IPCC, 2018. Mode of access: https://www.ipcc.ch/site/ assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_ alone_LR.pdf
2. Paris Agreement [Electronic resource] United Nations. – 2015 – Mode of access: https://treaties.un.org/doc/Treaties/2016/02/20160215% 2006-03%20PM/Ch_XX VII-7-d.pdf
3. Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development [Electronic resource]: A/RES/70/1. United Nations. – Mode of access: https://sustainabledevelopment.un.org/content/ documents/2125 2030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf
4. Abdullah A. L. Technology Progress on Photovoltaic Thermal (PVT) Systems with Flat-Plate Water Collector Designs: A Review / A. L. Abdullah, S. Misha, N. Tamaldin, M. A. M. Rosli, F. A. Sachit. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. 2019. Vol. 59, no. 1. P. 107–141. – ISSN 2289-7879.
5. Zhelykh V. Solar collectors integrated into transparent facades [Electronic resource] / V. Zhelykh, I. Venhryn, K. Kozak, S. Shapoval. Production Engineering Archives. 2020. Vol. 26, no. 3. P. 84–87. – ISSN 2353-5156. – Mode of access: https://doi.org/10.30657/pea.2020 .26.17

6. Diwania S. Photovoltaic-thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement [Electronic resource] / S. Diwania, S. Agrawal, A. S. Siddiqui, S. Singh. International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2020. – Vol. 11, no. 5. P. 33–54. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/ s40095-019-00327-y

7. Said Z. Predictions of UAE's renewable energy mix in 2030 [Electronic resource] / Z. Said, A. A. Alshehhi, A. Mehmood. Renewable Energy. 2018. Vol. 118. P. 779–789. – Mode of access: https://doi.org/ 10.1016/j.renene.2017.11.075

8. Hamdan M. A. Solar Thermal Hybrid Heating System / M. A. Hamdan, E. Abdelhafez, R. Ahmad, A. R. Alaboushi, A. Eman. Conference: Energy Sustainability and Water Resource Management for Food Security in the Arab Middle East. Beirut, Lebanon. Dec. 2014.

9. Zhelykh V. Solar collectors integrated into transparent facades [Electronic resource] / V. Zhelykh, I. Venhryn, K. Kozak, S Shapoval. Production Engineering Archives. 2020. Vol. 26, no 3, P. 84–87. – Mode of access: https://doi.org/10.30657/pea.2020.26.17.ISSN: 2353-5156.

10. Tripanagnostopoulos Y. Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems [Electronic resource] / Y. Tripanagnostopoulos. Solar Energy. 2007. Vol. 81, no. 9. P. 1117–1131. – Mode of access: https://doi.org/10.1016/j.solener.2007.04.002

11. Obstawski P. Comparison of solar collector testing methods – theory and practice [Electronic resource] / P. Obstawski, T. Bakon, D. Czekalski. Processes. 2020. No. 8. P. 1–29. – Mode of access: https://doi.org/ 10.3390/ pr8111340.

12. Ramos F. Hybrid Photovoltaic-Thermal Collectors [Electronic resource] / F. Ramos, A. Cardoso, A. Alcaso. IFIP Advances in Information and Communication Technology. 2010. Vol. 314. P. 477–484. – Mode of access: https://doi.org/ 10.1007/978-3-642-11628-5_53

13. Mysak S. Simulation of Hybrid Solar Collector Operation in Heat Supply System / S. Mysak, S. Shapoval, H. Matiko. Energy Engineering and Control Systems. 2023. Vol. 9, no. 2. P. 61–62.

14. Shapoval S. Application of rooftop solar panels with coolant natural circulation / S. Shapoval, N. Spodyniuk, V. Zhelykh, V. Shepitchak, P. Shapoval. Pollack Periodica. 2021. Vol. 16, no 1. P. 132–137.

15. Martynov V. Improving efficiency energy systems-photovoltaic modules and solar collectors in construction / V. Ploskyi, O. Sergeychuk, V. Usenko, M. Tereschuk. 2022 IEEE 3rd KhPI Week on Advanced Technology. KhPI Week 2022.

16. Sergeychuk O. The definition of the optimal energy-efficient form of the building / O. Sergeychuk, V. Martynov, D. Usenko. International Journal of Engineering and Technology (UAE). 2018. Vol. 7, no 3. P. 667–671.

17. Shapoval S. Analysis of Current Use of Renewable and Alternative Energy Sources by European Countries / S. Shapoval, S. Mysak, P. Shapoval, H. Matiko. Lecture Notes in Civil Engineering. 2024. No. 438. P. 381–391.

18. Склянко А. Дослідження роботи геліоустановки для спільної генерації електричної та теплової енергії / А. Склянко, А. Кучер. Матеріали IV Всеукраїнської студентської науково-технічної конференції «Природничі та гуманітарні науки. Актуальні питання», 19–20 квітня 2011 р. Т.: ТНТУ, 2011. Том 1. С. 275. (Електротехніка, електроніка та світлотехніка).

19. Суржик О. М. Теплофізичні характеристики геліоенергетичних модулів з композиційними тепловідводами: дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.14.08 «Перетворювання відновлюваних видів енергії» / Суржик Олександр Михайлович; НАН України, Інститут Відновлюваної Енергетики. К., 2016. 159 с.

УДК 621.31

АНАЛІЗ МЕХАНІЗМІВ ЗАЛУЧЕННЯ АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ ДО НАДАННЯ ПОСЛУГ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ

М. С. Черкашин[1], Т. П. Нечаєва[2]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (095) 548 38 32, e-mail: coatlketsal@gmail.com

Проаналізовані наявні механізми та стимули участі активних споживачів, а саме приватних домогосподарств, малих непобутових споживачів, енергетичних кооперативів, об'єднань співвласників багатоповерхових будівель, що обладнані сонячними установками, та/або установками зберігання енергії, в різних сегментах ринку електричної енергії України з метою надання послуг, що є актуальними для функціонування енергосистеми.

Ключові слова: *активний споживач, установка зберігання енергії, фотоелектрична станція, зелений тариф, механізм самовиробництва.*

ANALYSIS OF MECHANISMS FOR ATTRACTING ACTIVE CONSUMERS TO THE PROVISION OF SERVICES IN THE ELECTRICITY MARKET OF UKRAINE

M. Cherkashyn[1]*, *T. Nechaieva[2]

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (095) 548 38 32, e-mail: coatlketsal@gmail.com

The existing mechanisms and incentives for the participation of active consumers, specifically private households, small non-residential consumers, energy cooperatives, and associations of co-owners of multi-apartment buildings equipped with solar installations and/or energy storage systems, in various segments of Ukraine's electricity market have been analyzed, with the aim of providing services that are relevant to the functioning of the energy system.

Key words: *active consumer, energy storage system, photovoltaic power station, feed-in tariff, self-generation mechanism*

ORCID: [1]0009-0009-3525-3669 [2]0000-0001-9154-4545;

Приєднання України до Енергетичного Співтовариства в 2011 році започаткувало нові принципи побудови та функціонування енергетичної сфери, зокрема електроенергетики. Поетапна імплементація енергетичних пакетів поступово змінювала модель роботи ринку електроенергії, що істотно вплинуло на склад учасників ринку, їхні функції, обов'язки та можливості. Споживачі електроенергії також стали частиною цих змін. За майже десятиліття трансформації їхня роль і значення в електроенергетичній галузі перейшли на якісно новий рівень – з пасивних елементів системи вони стали активними учасниками, що отримали можливість брати участь у формуванні процесів в енергетичній сфері, керуванні ними, забезпеченні їхніх режимів.

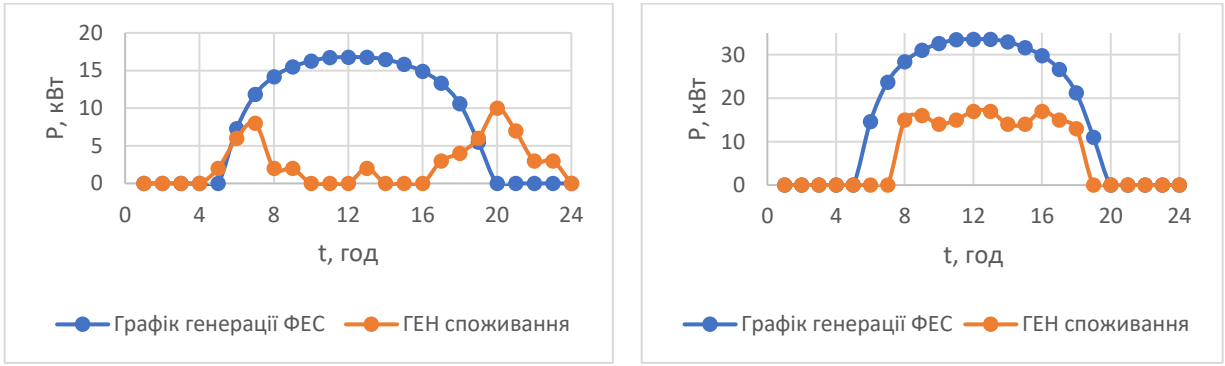
Згідно з [1–3] активні споживачі електричної енергії отримали можливість встановлювати генерувальні установки, призначені для виробництва електричної енергії з певними обмеженнями. Для приватних домогосподарств потужність таких установок не може перевищувати 50 кВт, для інших споживачів, зокрема енергетичних кооперативів, – 150 кВт. Щодо реалізації механізмів надання послуг активними споживачами на ринку електричної енергії через застосування «зеленого» тарифу, механізму самовиробництва діють додаткові обмеження для приватних домогосподарств – потужність генерувальної установки не може перевищувати 30 кВт, потужність генерувальної установки на об'єкті великого непобутового споживача не може перевищувати 5 МВт. Окрім установок генерації активні споживачі можуть бути облаштовані установками зберігання енергії (УЗЕ) та провадити господарську діяльність зі зберігання енергії. Електромобіль також може бути використаний як установка зберігання енергії.

За таких умов активні споживачі, згідно з [1, 2], мають право:

– брати участь у ринку допоміжних послуг;
– надавати послуги з балансування;
– здійснювати купівлю-продаж електричної енергії на організованих ринках електричної енергії, що діють в Україні.

На оптових сегментах ринку електричної енергії діють певні обмеження щодо мінімальних обсягів електричної енергії, запропонованих до продажу [2, 4]. Такі обмеження можуть стати на заваді участі окремих невеликих активних споживачів у вищезазначених сегментах ринку. Рішенням цього питання є об'єднання таких споживачів в агреговані групи – балансувальні групи для надання послуг з балансування, агрегованої групи агрегатора з метою купівлі-продажу електричної енергії, надання допоміжних послуг та/або послуг з балансування на ринку електричної енергії.

Для активних споживачів, що розташовані в Київській області, обладнаних установками сонячної генерації (РФЕС1=20 кВт; РФЕС2=40 кВт) та зберігання енергії (РУЗЕ1=5 кВт; РУЗЕ2=15 кВт), були визначені рівні дохідності через використання «зеленого» тарифу, механізму самовиробництва [5] за результатами участі в окремих сегментах ринку електричної енергії України. На рис. 1 наведені графіки генерації фотоелектричними установками у типовий літній день червня, що улаштовані на об'єктах активних споживачів – приватного господарства та малого непобутового споживача, а також графіки електричних навантажень (ГЕН), що відображають динаміку добового споживання електричної енергії з мережі активних споживачів у типовий день червня.



а б

Рис. 1. Графіки генерації та споживання електричної енергії для активних споживачів: а – приватне домогосподарство; б – малий непобутовий споживач

За результатами розрахунків було визначено, що для приватних домогосподарств зі статусом активного споживача, за відсутності та наявності УЗЕ, «зелений» тариф є привабливішим за механізм самовиробництва. «Зелений» тариф не є диференційованим за годинами доби. Отже, цей факт свідчить про відсутність стимулювання таких споживачів до участі в регулюванні режимів, що відбуваються в розподільчих мережах, за місцем електричного приєднання таких споживачів. Для малих непобутових споживачів ситуація зворотна. За наявності УЗЕ та впровадження заходів з перенесення в часі власного споживання в зону «провалу» споживання енергосистеми, а також перенесення видачі енергії сонячної генерації в мережу в зону найвищих цін вартості електричної енергії на ринку «на добу наперед», використання механізму самовиробництва є пріоритетним.

ПОСИЛАННЯ

5. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 12.03.2025).
6. Про затвердження Правил ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 307. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text (дата звернення: 04.03.2025).
7. Про затвердження Правил роздрібного ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 312. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0312874-18#Text (дата звернення: 04.03.2025).
8. Про затвердження Правил ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку: Постанова НКРЕКП від 14.03.2018 № 308. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text (дата звернення: 04.03.2025).
9. Про затвердження Порядку продажу та обліку електричної енергії, виробленої активними споживачами, та розрахунків за неї: Постанова НКРЕКП від 29.12.2023 № 2651. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v2651874-23#n9 (дата звернення: 06.03.2025).

УДК 620:9

ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ АНАЛІЗУ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ ПРИ МАГНІТОСТРИКЦІЙНОМУ НЕРУЙНІВНОМУ КОНТРОЛІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ

С. В. Созонов[1], І. В. Богачев[1], О. Л. Декуша[12], Ю. В. Куц[1]

[1]Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (050) 377-97-97, e-mail: swiftpolyscientist@gmail.com
[2]Інститут технічної теплофізики НАН України
вул. Марії Капніст (Желябова), 2а, м. Київ, 03057, Україна

При вдосконаленні методу аналізу даних вимірювань у роботі використовувалася система ультразвукового контролю з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами, за допомогою якої з'явилась можливість отриманння даних при проведенні практичних досліджень.

Ключові слова: *малоапертурний магнітострикційний перетворювач, співвідношення сигнал/шум, час затримки ультразвукового імпульсу.*

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF MEASUREMENT DATA ANALYSIS IN MAGNETOSTRICTIVE NON-DESTRUCTIVE TESTING OF ENERGY FACILITIES

S. Sozonov[1], I. Bohachev[1], O. Dekusha[12], Y. Kuts[1]

[1]General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (050) 377-97-97, e-mail: swiftpolyscientist@gmail.com
[2]Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine
2a, Marii Kapnist (Zhelyabova) Str., Kyiv, 03057, Ukraine

To improve the method of analyzing measurement data, we used an ultrasonic control system with small-aperture magnetostrictive transducers, which made it possible to obtain data during practical studies.

Key words: *small aperture magnetostrictive system, signal/noise, delay time, signal amplitude*

ORCID: [1]0000-0002-7584-4529; [1]0000-0001-7781-5767; [12]0000-0003-3836-0485; [1]0000-0002-8493-9474

Магнітострикційний метод ультразвукової дефектоскопії має низку переваг, як-от можливість контролю об'єктів складної форми, за високих температур, з сухим контактом та в умовах обмеженого доступу [1]. Однак особливості генерації та поширення ультразвукових хвиль магнітострикційними перетворювачами призводять до низького співвідношення сигнал/шум, що обмежує застосування методу. Метою цієї роботи є вдосконалення методу аналізу даних системи ультразвукового контролю з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами.

Під час використання систем ультразвукового контролю з малоапертурними магнітострикційними перетворювачами ультразвукова хвиля поширюється у контрольованому об'єкті у вигляді півсфери для поздовжних хвиль та у вигляді кола для поверхневих хвиль. Це призводить до швидкого зменшення амплітуди ультразвукового сигналу з віддаленням від джерела, що своєю чергою знижує співвідношення сигнал/шум на виході приймачів. У таких умовах виявлення корисних сигналів у суміші з шумом стає складним завданням [2, 3].

Для часткового вирішення цієї проблеми можна застосувати конструктивні методи, спрямовані на збільшення потужності випромінювання та підвищення чутливості приймальних датчиків. Іншим підходом є вдосконалення алгоритмів обробки сигналів, що надходять з магнітострикційних приймачів.

Фільтрація сигналу для усунення впливу шуму може призвести до зміщення початку сигналу, що збільшує похибку визначення часу затримки [4, 5]. Щоб мінімізувати цю похибку, пропонується обчислювати початок сигналу відносно опорної точки, яка залишається незмінною після фільтрації.

Важливою задачею є автоматизація аналізу даних, отриманих магнітострикційним методом. Запропоновано основний режим дослідження: визначення параметрів проходження імпульсу: часу затримки та амплітуди сигналу. Точність вимірювання підвищено врахуванням конструктивних особливостей датчиків та властивостей матеріалів.

Додаткові режими дозволяють досліджувати швидкість поширення ультразвукової хвилі в об’єкті, що контролюється, та час затримки проходження ультразвукового импульсу в магнітострикційних перетворювачах. Це покращує точність вимірювань основних параметрів.

Запропонований вдосконалений алгоритм опрацювання сигналів випробовано при визначенні затримки та амплітуди розповсюдження поверхневих, поздовжних хвиль та хвиль Лемба в різноманітних зразках. Отримані результати показали високу достовірність виявлення дефектів.

ПОСИЛАННЯ

1. Bohachev, I., Babak, V. & Zaporozhets, A.: Novel small-aperture transducers based on magnetostrictive effect for diagnostic systems. Tekhnichna Elektrodynamika. 2022, 3, 69–78.
2. Karpenko D., Yevtukhova T., Novoseltsev O. Method for assessing the efficiency of the district heating system under market conditions. Vidnovluvana Energetika. 2024. No. 4(79). Pp. 6–16. DOI: 10.36296/1819-8058.2024.4(79).6-16
3. Ashish, A., Rajagopal, P., Balasubramaniam, K., Kumar, A., Rao, B., & Jayakumar, T.: Bulk ultrasonic NDE of metallic components at high temperature using magnetostrictive transducers. In AIP Conference Proceedings, 1806(1). (2017) https://doi.org/10.1063/1.4974604
4. Duarte-Salazar, C. A., Castro-Ospina, A. E., Becerra, M. A., & Delgado-Trejos, E. (2020). Speckle Noise Reduction in Ultrasound Images for Improving the Metrological Evaluation of Biomedical Applications: An Overview. *IEEE*, 8, 15983−15999. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2967178
5. Zhang, M., Li, M., Zhang, J., Liu, L., & Li, H. (2020). Onset detection of ultrasonic signals for the testing of concrete foundation piles by coupled continuous wavelet transform and machine learning algorithms. *Advanced Engineering Informatics*, 43, 101034. https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101034

УДК 621.311.8

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗКОНТАКТНОГО ДВИГУНА З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

М. А. Коваленко[1], О. О. Базаров[2], І. Я. Коваленко[3], Є. О. Тітов[4]

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
03056, м.Київ, просп. Перемоги, 37,
тел./факс: +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko_ma@i.ua

Розроблено чисельну двовимірну математичну модель безконтактного двигуна з постійними магнітами. Ця модель дозволяє оцінити параметри двигуна, розподіл електромагнітного поля, втрати в магнітному осерді та вихрові струми при різних способах живлення (синусоїдальне та імпульсне з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)). Під час розв'язання поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення математичних моделей.

Ключові слова: *математичне моделювання, постійні магніти, електромагнітні втрати, широтно-імпульсна модуляція, оптимізація, енергоефективність.*

MATHEMATICAL MODELING OF A CONTACTLESS HIGH-SPEED MOTOR WITH PERMANENT MAGNETS

M. Kovalenko[1], O. Bazarov[2]

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056
Tel./fax +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko_ma@i.ua

A numerical two-dimensional mathematical model of a contactless motor with permanent magnets has been developed. The developed model allows to estimate the parameters of the motor, the distribution of the electromagnetic field, losses in the magnetic core and eddy currents for different power supply methods (sinusoidal and pulsed using pulse-width modulation (PWM)). When solving the problems set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem based on the study of mathematical models were used.

Key words: *mathematical simulation, permanent magnets, electromagnetic losses, pulse-width modulation, optimization, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0002-5602-2001; [2]0009-0008-8491-2678, [3]0000-0003-1097-2041; [4]0009-0007-8222-7477

У роботі розглядається чисельне двовимірне математичне моделювання безконтактного двигуна з постійними магнітами (БДПМ). Розроблена модель дозволяє оцінити параметри двигуна, розподіл електромагнітного поля, втрати в магнітному осерді та вихрові струми при різних способах живлення (синусоїдальне та імпульсне з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ)). Сітка скінченних елементів у розрахунковій області досліджуваного двигуна представлена на рис. 1.

Деякі особливості конструкції доліджуваного двигуна. Постійні магніти монтуються між виступами на внутрішній поверхні втулки ротора і намагнічуються радіально. Постійні магніти мають складну радіальну форму, що повторює дугу внутрішньої розточки втулки ротора з одного боку та дозволяє витримувати рівномірний повітряний проміжок між статором та ротором двигуна. Постійні магніти виконані секторальними з однорідною намагніченістю в радіальному напрямку зі сплаву неодим-залізо-бор марки N52H із залишковою магнітною індукцією 1,36 Т при 20 °С.

Статор двигуна (магнітне осердя статора) виконаний зі шихтованих пластин, виготовлених із електротехнічної сталі. Втулка статора виготовлена із легкого немагнітного сплаву як одна цільна деталь. У внутрішній частині втулки встановлюються 2 підшипники (на рис. 1 не показані). Обмотка статора розміщується в пазах магнітного осердя статора і з'єднується по схемі трикутник.

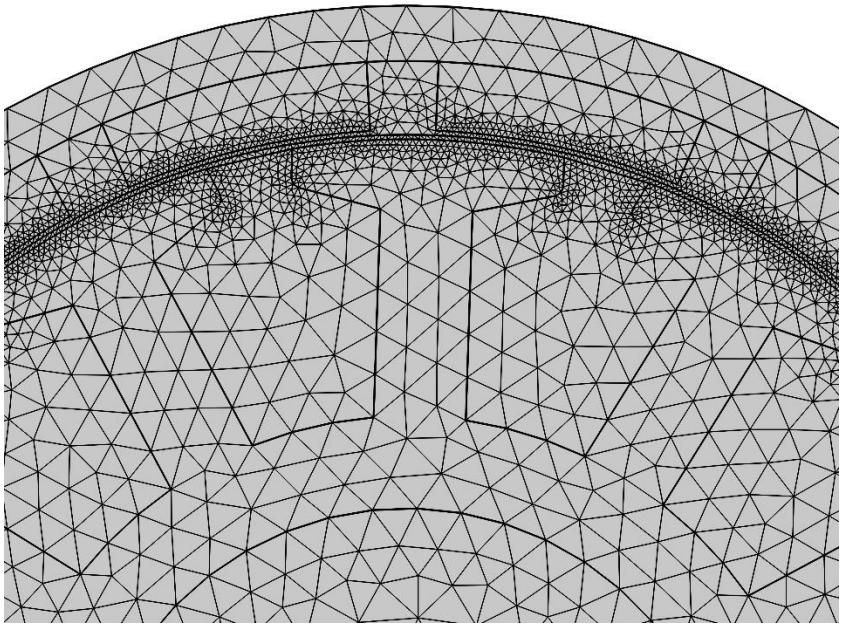


Рис. 1. Сітка скінченних елементів розрахункової області досліджуваного двигуна

Результати досліджень показали, що при живленні двигуна від інвертора з ШІМ втрати збільшуються на ≈53−62 % у порівнянні з живленням від синусоїдального джерела. Встановлено, що зростання швидкості обертання в 4 рази призводить до збільшення втрат на ≈260 %. Визначено, що найбільші втрати зосереджені в магнітному осерді статора, зокрема в зубцях, де спостерігається найбільша щільність магнітного потоку.

Для оптимізації конструкції двигуна запропоновано використання прямокутної форми постійних магнітів, що дозволяє зменшити втрати на 20−36 % і водночас спростити та здешевити виробництво двигуна. Однак така модифікація призводить до зменшення електромагнітного моменту на 22,5−30 %.

Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкцій високошвидкісних двигунів з постійними магнітами, що сприятиме підвищенню їх ефективності та надійності в промислових і транспортних застосуваннях.

Практична значимість роботи полягає в можливості застосування отриманих результатів для розробки енергоефективних електромеханічних систем, зокрема на транспорті, у безпілотних літальних апаратах, побутових електроприладах та електроінструментах. Запропоновані конструктивні рішення дозволяють не лише знизити енергоспоживання, а й підвищити довговічність та експлуатаційну надійність двигунів.

Перспективи подальших досліджень спрямовані на розширення математичної моделі для тривимірного аналізу, врахування теплових ефектів та розробку оптимальних алгоритмів керування для мінімізації втрат та підвищення ефективності роботи високошвидкісних двигунів.

ПОСИЛАННЯ

1. Wan, Yuan & Wu, Shaopeng & Cui, Shumei. (2016). Choice of Pole Spacer Materials for a High-Speed PMSM Based on the Temperature Rise and Thermal Stress. IEEE Transactions on Applied Superconductivity. 26. 1-1. 10.1109/TASC.2016.2594847.
2. Коваленко М., Ткачук І., Коваленко І., Жук С., Кришньов О., Перепелиця О., Тітов Є. (2024). Огляд двигунів для важких дронів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика*, (1 (11), 35–40. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2024.1.07.
3. Wan, Yuan & Li, Qiang & Guo, Jian & Cui, Shumei. (2020). Thermal analysis of a Gramme-ring-winding high-speed permanent-magnet motor for pulsed alternator using CFD. IET Electric Power Applications. 14. 10.1049/iet-epa.2020.0086.
4. K. Aiso, K. Akatsu and Y. Aoyama, 2021. A Novel Flux-Switching Magnetic Gear for High-Speed Motor Drive System, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 68, no. 6, pp. 4727-4736. doi: 10.1109/TIE.2020.2988230.

УДК 621.3.051

MICROGRID – СИСТЕМА ПРОГНОЗУВАННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ В НИЗЬКОВОЛЬТНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

О. В. Окушко, І. П. Радько, В. А. Наливайко, В. В. Васюк, Д. С. Сорокін

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна,
тел.: (67) 495 6618, e-mail: okushko@nubip.edu.ua

У роботі розглянуто значення інтелектуальних Microgrid-систем при підвищенні надійності, ефективності та адаптивності експлуатації електротехнічного обладнання, що функціонує в умовах низьковольтних електромереж. Особлива увага приділяється системам моніторингу та прогнозування стану електродвигунів, інверторів, трансформаторів тощо на основі інтелектуальних технологій – зокрема IoT, штучного інтелекту та машинного навчання.

Ключові слова: *microgrid, інтелектуальні системи, електротехнічне обладнання, моніторинг, прогнозування, низьковольтні мережі, IoT, ШІ, енергоефективність.*

MICROGRID SYSTEM AS A FACTOR FOR FORECASTING THE OPERATION OF ELECTRICAL EQUIPMENT IN LOW-VOLTAGE ELECTRICITY CONSUMPTION SYSTEMS

O. Okushko, I. Radko, V. Nalyvayko, V. Vasyuk, D. Sorokin

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine,
tel.: (67) 495 6618, e-mail: okushko@nubip.edu.ua

The paper examines the importance of intelligent Microgrid systems in increasing the reliability, efficiency and adaptability of electrical equipment operating in low-voltage power grids. Particular attention is paid to systems for monitoring and forecasting the state of electric motors, inverters, transformers, etc. based on intelligent technologies - in particular, IoT, artificial intelligence and machine learning.

Keywords: *microgrid, intelligent systems, electrical equipment, monitoring, forecasting, low-voltage networks, IoT, AI, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0002-4235-3969; [2]0000-0002-1894-5294; [3]0000-0002-6297-9045; [4]0000-0003-2102-6878; [5]0000-0002-1762-9724

Сучасні низьковольтні системи електропостачання широко застосовують електротехнічне обладнання – електродвигуни, інвертори, контактори, автоматичні вимикачі тощо. Безперебійна та енергоефективна робота цього обладнання є критично важливою для промислових об'єктів. Традиційні підходи до обслуговування, що ґрунтуються на графіках або реакції на відмови, не відповідають сучасним вимогам. Тому зростає актуальність інтелектуальних систем, що поєднують гнучке управління, моніторинг і прогнозування в межах Microgrid-архітектури.

Microgrid виступає як локальна енергетична система, що поєднує різні джерела живлення, накопичувачі енергії та електротехнічне обладнання в єдину керовану структуру. Впровадження таких інтелектуальних систем дозволяє автоматично аналізувати дані, виявляти потенційні несправності, прогнозувати ресурси обладнання й адаптувати режими їх роботи.

Така система забезпечує локальне управління та гнучкий розподіл енергоресурсів. Завдяки інтеграції сенсорів IoT у компоненти електрообладнання (двигуни, контактори, інвертори) забезпечується безперервний моніторинг параметрів: струмів, напруг, температур, вібрацій, – які використовуються для аналізу технічного стану в реальному часі.

Вибір обладнання й технологій залежить від специфіки підприємства, характеристик електрообладнання, умов його експлуатації та бюджету на технічне обслуговування. При цьому використання сенсорів у межах IoT може забезпечити безперервний збір параметрів роботи обладнання: температура, вібрації, споживаний струм, напруга,

частота тощо. Дані передаються в аналітичні системи, де обробляються в реальному часі, забезпечуючи умови для адаптивного управління.

Ретельний вибір сенсорів, програмного забезпечення та алгоритмів прогнозування дозволить підвищити надійність роботи системи, знизити ризики відмов та досягти більш високої енергоефективності.

На рис. 1 наведена Microgrid-система з використання програмного забезпечення компанії Schneider Electric Ukraine.

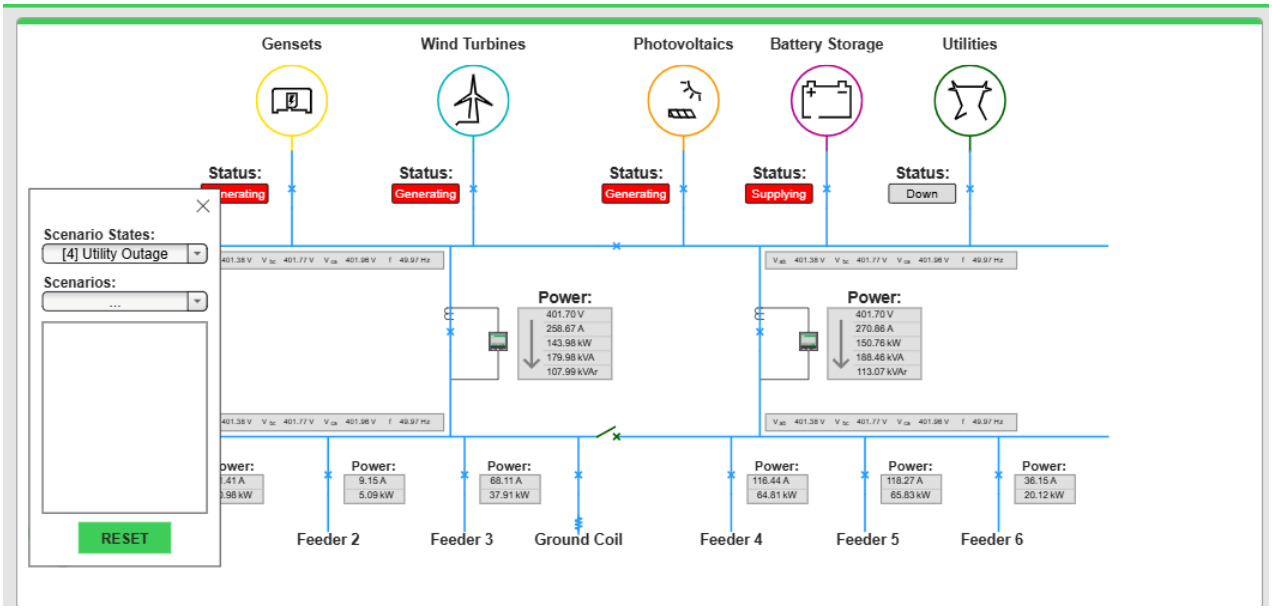


Рис. 1. Microgrid-система

Тестування й оцінка ефективності розробленої системи моніторингу і прогнозування стану електродвигунів є важливим етапом у забезпеченні її надійності, точності та здатності до виконання заявлених функцій. Цей процес включає різні методи перевірки роботи системи, від оцінки точності алгоритмів прогнозування до перевірки реальної роботи під час експлуатації.

Отже, інтелектуальні Microgrid-системи здатні перерозподіляти навантаження між електроприймачами, оптимізуючи роботу всіх компонентів системи, що дозволить знизити пікові навантаження, підвищити ККД і зменшує знос обладнання, зменшуючи витрати на ремонт і технічне обслуговування.

ПОСИЛАННЯ

1. Блінов І. В. Впровадження міжнародних стандартів та моделі оптимізації функціонування мікромереж (microgrid) в Україні.
2. Режим доступу: https://www.iec-expo.com.ua/download/2024/kongres/presentation_2.3.pdf.
3. Дерев`янко Д. Г., Перегуда О. В. Особливості побудови систем smart-моніторингу microgrid систем. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 1. С. 57–64. ISSN 2308-7382. DOI: https://doi.org/10.20535/1813-5420.1.2024.298816
4. Кириленко О. В., Стогній Б. С., Денисюк С. П., Сопель М. Ф. Smart-моніторинг електроенергетичних систем. Технічна електродинаміка. 2024. № 5. С. 48–62. ISSN 1607-7970.
5. DOI: https://doi.org/10.15407/techned2024.05.04
6. Lasseter, R., Akhil, A., Marnay, C. et al. (2002) White Paper on Integration of Distributed Energy Resources. The CERTS Microgrid Concept. CA: Tech. Rep. LBNL-50829, Consortium for Electric Reliability Technology Solutions (CERTS)
7. Katiraei, F., Iravani, R., Hatziargyriou, N., and Dimeas, A. (2008) Microgrid management control and operation aspects of microgrids. IEEE Power & Energy Magazine.

УДК 621.313.322

ВИКОРИСТАННЯ СЕНСОРА TGS 821 У СИСТЕМАХ КОНТРОЛЮ ВИТОКІВ ВОДНЮ

Є. О. Зайцев[1], Б. А. Кромпляс[2], А. С. Левицький[3], В. О. Березниченко[4], В. І. Бородій[5]

[1, 2, 3, 4, 5]Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейский, 56, 03057, Київ, Україна
[1]Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики НАН України, просп. Академіка Палладіна, 34-А, Київ, Україна
тел.: (068)240-25-73, e-mail: zaitsev@i.ua

У доповіді розглядається актуальність використання водню як перспективного енерго- і теплоносія та його застосування в енергетичних системах і теплообмінних процесах, зокрема в турбогенераторах. Зазначено, що малі розміри молекул водню спричиняють суттєві ризики витоків, навіть через мікрощілини та мікронерівності в з'єднаннях. Показано структуру системи контролю витоків з використанням сенсора TGS 821. Висока чутливість, селективність та стабільність роботи сенсора дають змогу виявляти концентрації водню від 50 ppm, що забезпечує безпечну експлуатацію обладнання та моніторинг роботи електролізерів. Зазначено, що розроблена структурна система може бути застосована для визначення концентрації водню, ефективності фільтрації водню та визначення можливих відхилень, що можуть свідчити про зниження чистоти газу або необхідність коригування параметрів електролізу.

Ключові слова: *водень, безпека, сенсори, контроль водню, промисловість, система.*

UTILIZATION OF TGS 821 SENSOR IN HYDROGEN LEAK DETECTION SYSTEMS

Ie. Zaitsev[1], B. Kromplyas[2], A. Levytsky[3], V. Bereznychenko[4], V. Borodii[5]

[1, 2, 3, 4, 5]The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine
56 Beresteyskiy avenue, 03057, Kyiv, Ukraine
[1]Center for Information-analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the National Academy of Sciences of Ukraine, Akademika Palladina avenue, 34-A, Kyiv, Ukraine
Phone: (068)240-25-73, e-mail: zaitsev@i.ua

In report considers the relevance of using hydrogen as a promising energy and heat carrier and its application in energy systems and heat exchange processes, in particular in turbogenerators. The structure of the leak control system using the TGS 821 sensor was showing. It was shown that developed structural system can be used to determine the hydrogen concentration, the efficiency of hydrogen filtration and identify possible deviations that may indicate a decrease in gas purity or the need to adjust the electrolysis parameters was demonstrated.

Key words: *hydrogen, safety, sensors, hydrogen control, industry, system.*

ORCID: [1]0000-0003-3303-471X; [2]0000-0001-7164-8056; [3]0000-0002-0146-9498; [4]0000-0002-9961-1703; [5]0009-0002-3166-6991

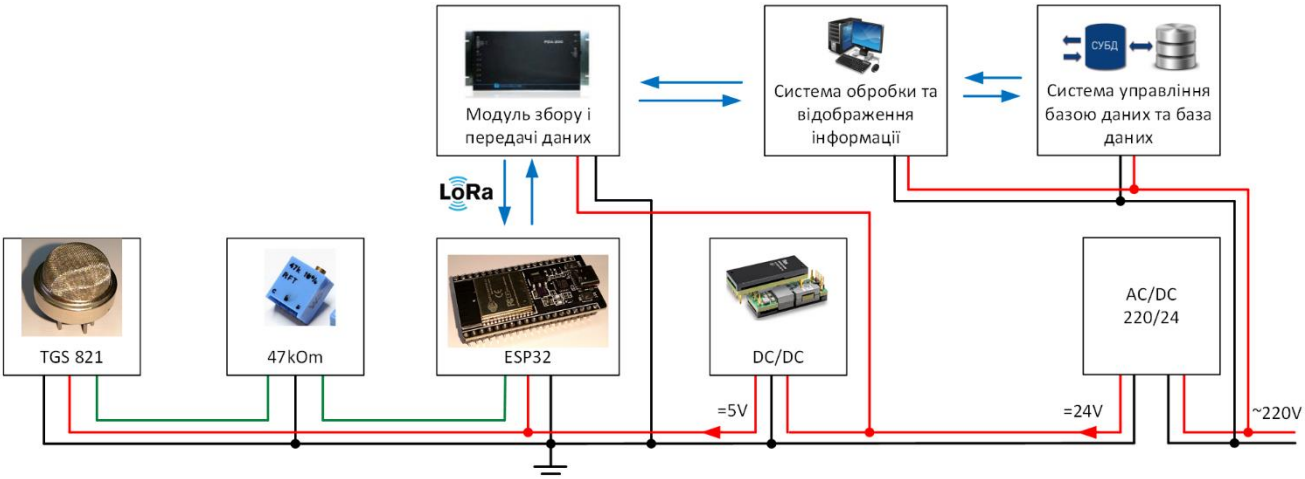
Постійне зростання попиту на енергію у світі, а також прагнення до декарбонізації виробництва електроенергії спонукає до пошуку нових екологічно чистих відновлюваних джерел енергії.

Одним з перспективних напрямів розвитку відновлювальних джерел енергії є використання водню як альтернативного палива. Водень є екологічно чистим джерелом енергії, оскільки під час його спалювання або використання в паливних елементах утворюється лише водяна пара, яка не завдає шкоди навколишньому середовищу. Крім того, водень застосовується в теплообмінних системах, зокрема як ефективне охолоджувальне середовище в енергетичних установках, таких як турбогенератори. У чистому вигляді водень має теплопровідність близько 0,18 Вт/(м·К) за стандартних умов (20 °С). Таке значення теплопровідності вище, ніж у повітря (0,025 Вт/(м·К)), на порядок.

Однак широке використання водню на практиці потребує вирішення низки технічних і безпекових проблем.

Адже газоподібний водень складається з молекул H_2, у кожній з яких два атоми водню, з'єднані між собою. Завдяки своїй структурі водень є найменшою молекулою, що існує в оточуючій нас природі. Ця властивість водню, пов'язана з його низькою молекулярною вагою та високою рухливістю молекул, зумовлює високу схильність до витоків у місцях з'єднань та ущільнювачів крізь навіть найменші отвори або щілини в матеріалах, що стримують гази, а також до виникнення дифузійних витоків, які своєю чергою призводять до накопичення газу в приміщеннях. Незважаючи та те,

що діапазон концентрацій водню в повітрі, достатніх для займання, досить великий – від 4 до 75 % за об'ємом (для порівняння, метан займистий у повітрі лише в пропорції від 4,4 до 17 % за об'ємом), його енергія займання становить всього 0,017 мДж, що набагато менше, ніж в інших видів палива, наприклад бензину або природного газу – приблизно 0,3 мДж для сумішей метан/повітря або пропан/повітря [2, 3]. Тому важливою задачею є фіксація та усунення витоків водню на ранніх етапах, коли концентрація водню в повітрі є низькою. Фіксація та контроль рівня досягається застосуванням відповідних систем контролю витоків водню, що як чутливі елементи використовують різні типи сенсорів, чутливих до наявності водню в середовищі. Одним з таких сенсорів є газовий сенсор водню TGS 821 виробництва Figaro Engineering. На рис. 1 наведено схему вимірювання концентрації водню на базі використання мікроконтролера ESP32 та сенсора водню TGS 821. Сенсор TGS 821 відзначається простотою використання, високою чутливістю та селективністю до водню, стабільністю роботи, стійкістю до змін навколишнього середовища та можливістю виявлення концентрації водню від 50 ppm. Основний принцип дії схеми вимірювання, наведеної на рис. 1, такий: молекули водню взаємодіють з поверхню чутливого елементу сенсора TGS 821, зменшуючи його опір відповідно до концентрації газу. Навпаки, зі зниженням концентрації водню опір зростає, що приводить до зниження вихідної напруги. Таким чином, зміна концентрації газу впливає на опір сенсора та рівень вихідного сигналу, що дозволяє визначати наявність водню та його концентрацію. Для регулювання рівня напруги на вході мікроконтролера використано додатковий резистор. Дані, отримані мікроконтролером ESP32, передаються з використанням бездротового зв'язку до засобів обробки та аналізу. Результати вимірювання проходять попередню фільтрацію для усунення шумів та аномальних значень, після чого виконуються обчислення для оцінки концентрації водню.



Рисунок

Отримані в такий спосіб дані із сенсорів концентрації водню в різних контрольно-діагностичних точках електролізної установки з урахуванням її режиму роботи можуть бути використані для контролю наявності водню в повітрі приміщень, де розміщені електролізні установки, або за відповідного розташування сенсорів вони можуть використовуватися для контролю стабільності процесу електролізу, ефективності сепарації водню від кисню. Отримані таким чином контрольно-діагностичні параметри дозволяють визначати можливі відхилення, що можуть свідчити про зниження чистоти газу або необхідність коригування параметрів електролізу, або необхідність проведення ремонтно-відновлювальних робіт електролізних установок.

Роботу виконано за держбюджетними темами: «Розширення функціональних можливостей та підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання в системах моніторингу і діагностування в електроенергетиці» (шифр теми «Параметр-Д»), державний реєстраційний номер теми 0122U000136 та «Розроблення нових математичних моделей та методів дослідження електрофізичних процесів і полів в електротехнічному обладнанні для вирішення задач надійної експлуатації та діагностування» (шифр теми «Комплекс-5»), КПКВК6541030.

ПОСИЛАННЯ

1. Lanz, W. Hydrogen Properties. Hydrogen Fuel 47 (2001).
2. ISO – ISO/TR 15916:2015 – Basic considerations for the safety of hydrogen systems. URL: https://www.iso.org/standard/56546.html. (Дата звернення 04.04.2022).
3. Haase, H. Electrostatic hazards. Their evaluation and control. (Verlag Chemie, 1977).
4. Special Sensor for Hydrogen Gas TGS 821. User manual. URL: https://www.figarosensor.com/product/docs/TGS821.pdf.

УДК 621.316.7

АНАЛІЗ ВПЛИВУ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ДИНАМІЧНУ СТІЙКІСТЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

В. С. Карнаух

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (099) 272-26-22, e-mail: vitkar19@gmail.com

В умовах збільшення частки розподіленої генерації в Україні і світі особливий інтерес зосереджний на дослідженні впливу відновлюваних джерел енергії на стабільність енергосистеми в перехідних режимах. У цій роботі розглядається вплив відновлюваної генерації на коливання частоти енергосистеми з усіма викликаними цим недоліками, а також шляхи їх подолання всередині безвуглецевої стратегії розвитку енергетики.

Ключові слова: *розподілена генерація, відновлювані джерела енергії, частота, віртуальна інерція, стабільність.*

ANALYSIS OF THE DISTRIBUTED GENERATION IMPACT ON ELECTRIC POWER SYSTEM DYNAMIC STABILITY

V. Karnaukh

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (099) 272-26-22, e-mail: vitkar19@gmail.com

Intensive increasing of distributed generation energy market share creates special attention to the question of how it influences the electric power system stability. This research performs analysis of DG impact on the frequency deviations of the electric power grid including disadvantages and ways to cope with them inside carbon free stategy of energy sector development.

Key words: *distributed generation, renewable sources of energy, frequency, virtual inertia, stability.*

ORCID: 0009-0007-3204-3901

Тенденції останніх восьми років свідчать про значне збільшення встановленої потужності генерації від відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у світі, а саме з 1851 ГВт в 2016 році до 4448 ГВт в 2024-му [1].

Щодо ситуації в енергетичному секторі України, доля відновлюваних джерел в загальному виробництві електроенергії за 2023 рік становила 22 %, тоді як для Європи цей показник становив 42 % [2]. У 2024 році обсяг виробленої електроенергії з відновлюваних джерел в Україні збільшився на 11 %, порівняно з 2023 роком [3], що вказує на стрімкий розвиток відповідно до безвуглецевої стратегії енергетики. Однак активне запровадження ВДЕ з інверторним підключенням вимагає детальнішого розгляду питання особливості роботи джерел розподіленої генерації (РГ) у перехідних режимах.

Перехідні режими виникають в енергосистемі при значних збуреннях, викликаних різницею між виробництвом і споживанням електроенергії (наприклад відключення потужного джерела енергії або споживача). Процес відхилення частоти характеризується параметром RoCoF (Rate of change of frequency), що описує швидкість зміни частоти та визначається за формулою [4]:

$$\frac{df}{dt}|_{t=0^+} = \frac{f_o}{2H_{sys}S_{sys}}\left(P_g - P_l\right) = \frac{\Delta P_{imbalance}\, f_o}{2H_{sys}S_B},$$

де $\Delta P_{imbalance}$ − це небаланс у МВт, H_{sys} − константа загальної системної інерції, S_{sys} − потужність системи, f_0 − частота мережі. Вплив різної частки ВДЕ на частоту і RoCoF зображено на рис. 1.

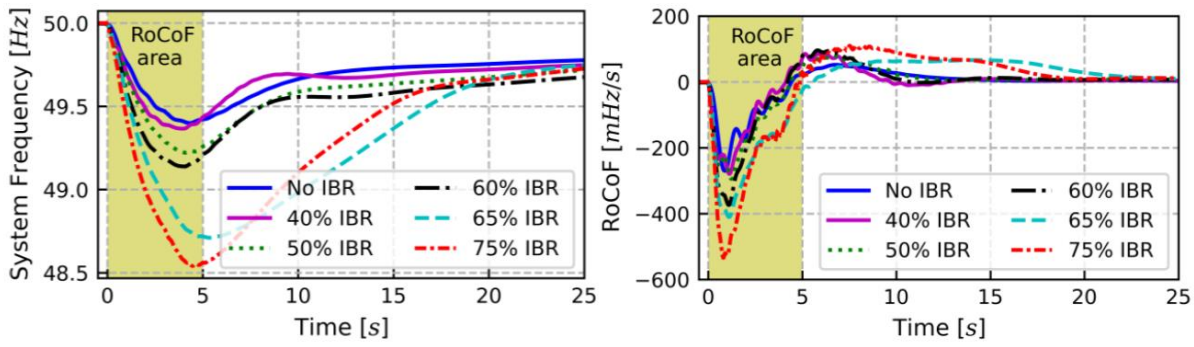


Рис. 1. Вплив ВДЕ на відхилення частоти під час збурення в системі

Традиційно в разі появи небалансу потужності в мережі первинному регулятору частоти потрібно близько 4 с, щоб почати компенсувати збурення [5]. Поки первинний регулятор не ввімкнувся, відхилення частоти (в більшу або меншу сторону) демфується за допомогою кінетично обертових мас синхронних генераторів, підключених до мережі. Вітрові турбіни з постійною швидкістю обертання (FSIG) безпосередньо підключаються до мережі й роблять внесок в динамічну стійкість системи за допомогою інерційного відгуку, подібно до синхронних генераторів. Однак вітрові агрегати зі змінною швидкістю обертання ротора (VSWT), які є більш розповсюдженими, разом із сонячними PV панелями підключаються до мережі через пристрої силової електроніки (частотні перетворювачі та інвертори), що унеможливлює природний інерційний відгук цих джерел РГ для подолання збурень за частотою [4].

Оскільки останніми роками все більше традиційних електростанцій замінюються відновлюваними джерелами енергії, то загальна інерція системи падає, що збільшує значення RoCoF і може викликати спрацювання реле частотного розвантаження споживачів ще до запуску первинного регулювання. У зв'язку з цим задля енергетичної безпеки, системні оператори ставлять вимоги до власників ВДЕ стосовно регулювання частоти й обмеження RoCoF.

Скомпенсувати відсутність природного інерційного відгуку джерел ВДЕ можна за допомогою таких способів [4]:

1. Віртуальна інерція вітрових агрегатів, що імітує інерційний відгук синхронного генератора шляхом тимчасового збільшення вихідної потужності генератора завдяки сповільненню ротора.
2. Робота вітрових турбін та сонячних PV панелей з обмеженням максимальної потужності з метою резервування на випадки перехідних режимів роботи.
3. Використання синхронного компенсатора (відпрацьований синхронний генератор), маховикового накопичувача енергії або їх поєднання для доповнення інерційного резерву системи.
4. Застосування систем накопичення енергії з технологією GFR (Grid forming) перетворювача частоти.

ВИСНОВОК. Незважаючи на падіння системної інерції через стрімке зростання частки ВДЕ в генеруванні потужності енергосистеми, існує досить багато шляхів сповільнення зміни частоти RoCoF. Наразі найдоцільнішим є залучення вітроустановок для регулювання частоти перехідних режимів та застосування синхронних компенсаторів (в минулому генераторів теплових станцій) окремо чи разом з маховиковими накопичувачами. Комбінування вище згаданих способів дозволить значно підвищити частку ВДЕ в загальній структурі генерації.

ПОСИЛАННЯ

1. IRENA. (2025). Renewable capacity statistics 2025. International Renewable Energy Agency. (Дата звернення: 05.04.2025).
2. UkraineInvest. (2024). Альтернативна енергетика. URL: https://ukraineinvest.gov.ua/industries/energy/alternative-energy (Дата звернення: 05.04.2025).
3. Ukrainian Institute for the Future. (2025). Відновлення української енергетики: сценарії та перспективи. URL: https://uifuture.org/publications/vidnovlennya-ukrayinskoyi-energetyky/ (Дата звернення: 07.04.2025).
4. Al Kez, D., Foley, A. M., Ahmed, F., & Morrow, D. J. (2022). Overview of frequency control techniques in power systems with high inverter based resources: Challenges and mitigation measures. SSRN. URL: https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=4292546 (Дата звернення: 10.04.2025).
5. Нестерко А.Б. (2016). Підвищення якості регулювання частоти електроенергетичної системи з відновлюваними джерелами енергії (Дисертація). НТУУ КПІ. (Дата звернення: 10.04.2025).

УДК 621.311.25

КОАЛІЦІЙНІ МОДЕЛІ ВЗАЄМОДІЇ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ У ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Д. Г. Дерев'янко[1], С. П. Денисюк[2], Г. С. Бєлоха[3], К. М. Гілевич[4]

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (099) 201-82-66, e-mail: dereviankodenys@gmail.com

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися теоретико-ігрові моделі взаємодії розосереджених енергетичних ресурсів. Визначено, що побудова коаліційних моделей взаємодії агрегованих розосереджених енергетичних ресурсів дає можливість отимізувати графіки роботи різнотипних розосереджених енергетичних ресурсів при їх агрегуванні.

Ключові слова: *розосереджені енергетичні ресурси, розосереджена генерація, теорія ігор, коаліційні ігри, режими роботи генераторів та навантажень, оптимізація, балансування.*

COALITION MODELS OF INTERACTION OF DISTRIBUTED ENERGY RESOURCES IN LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEMS

D. H. Derevianko[1], S. P. Denysiuk[2], H. S. Bielokha[3], K. M. Hilevich[4]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteyskyi Avenue, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
phone: (099) 201-82-66, e-mail: dereviankodenys@gmail.com

When solving the tasks set in the work, game-theoretic models of the interaction of distributed energy resources were used. It was determined that the construction of coalition models of the interaction of aggregated distributed energy resources makes it possible to optimize the operation schedules of different types of distributed energy resources when they are aggregated.

Key words: *distributed energy resources, distributed generation, game theory, coalition games, operating modes of generators and loads, optimization, balancing.*

ORCID: [1]0000-0002-4877-5601; [2]0000-0002-6299-3680; [3]0000-0003-4277-367X; [4]0000-0001-9074-0683.

З широким впровадженням різнотипних джерел розосередженої генерації (РГ) на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у т.ч. залучених до реалізації різних програм керування попитом на електричну енергію, з'являється нове поняття «розосереджених енергетичних речурчів». Розосереджені енергетичні ресурси (РЕР) належать до широкої категорії ресурсів, включаючи такі: РГ, розосереджені системи накопичення, системи реагування на попит (demand response) та електричні транспортні засоби [1].

На сьогодні, навіть зважаючи на існуючі механізми підтримки (зелений тариф) РЕР здебільшого не можуть повноцінно брати участь у роботі ринку електричної енергії.

Для участі у роботі більшості ринків електричної енергії генерувальні установки мають відповідати мінімальному порогу встановленої потужності [2]. Для більшості світових ринків електричної енергії це рівень встановленої потужності від 500 кВт до 1 МВт. Також важливим є питання, чи РЕР приєднано на стороні споживача, чи на стороні розподільної електричної мережі (ЕМ). Більшість РЕР не відповідають цьому порогу, включаючи більшість установок побутових споживачів. Ця нездатність РЕР брати участь у роботі ринків електроенергії як продавця є суттєвим фактором, який стримує широке впровадження РЕР в енергетичні системи, а також не дозволяє ISO/RTO реалізувати переваги, які РЕР можуть надати загальній енергосистемі (табл. 1) [3].

Агрегування РЕР дає змогу досягати необхідних значень встановленої потужності, таким чином даючи їм змогу брати участь у роботі оптових ринків електричної енергії. Разом з тим слід зауважити, що більшість РЕР засновані на некерованих джерелах РГ. Їх класифікацію можна провести наступним чином [1]: Некеровані генерувальні установки РГ (T_1); Керовані генерувальні установки РГ (T_2); Системи накопичення енергії (T_3).

Таблиця 1. Потенційні переваги агрегації РЕР для енергетичної системи

Переваги	Опис
Мережеві послуги	Надання послуг, необхідних для надійної роботи ЕМ. Приклади включають регулювання частоти, обертові та некрутильні резерви, а також чорний старт тощо
Диспетчеризація генерування	Здатність виробляти електроенергію, коли це необхідно (як визначено суб'єктом, таким як оператор мережі)
Усунення перевантаження мережі	Здатність забезпечити електроенергію або зменшити попит у системі, де лінії електропередачі не можуть передавати додаткову електроенергію через температурні обмеження, напругу або стабільність
Відстрочка оновлення обладнання систем передачі та розподілу	Можливість відстрочити заміну обладнання системи передачі або розподілу, використовуючи РЕР, щоб підтримувати потребу в електроенергії цього обладнання нижче його робочого ліміту, або дозволяючи його використовувати таким чином, щоб подовжити термін його експлуатації

Значна кількість РЕР типу T_1 формує задачу балансування генерування агрегатором щоб ефективно взаємодіяти з енергосистемою у межах роботи ринку електричної енергії. З огляду на процедуру агрегації різнотипних РЕР запропоновану у [1] дана задача може бути вирішена шляхом запровадження бонусних та штрафних платежів. Разом з тим, рівень взаємодії РЕР на етапі реалізації ними своїх типів можна оптимізувати, утворивши коаліції між гравцями різних типів (рис. 1).

У нашому випадку коаліція гравців буде представлена наступною множиною: $N = \{T_1, T_2, T_3\}$. Усі можливі коаліції K нашої гри (рис. 1): ø, $\{T_1\}$, $\{T_2\}$, $\{T_3\}$, $\{T_1, T_2\}$,$\{T_1, T_3\}$, $\{T_2, T_3\}$,$\{T_1, T_2, T_3\}$.

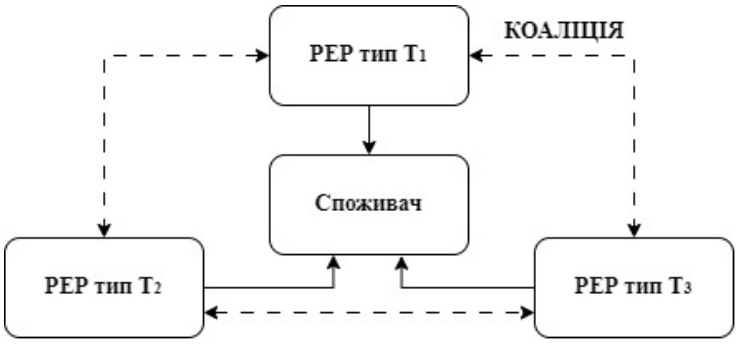


Рис. 1. Коаліція між різними типами РЕР

Подамо гру у нормальній формі $G = (N, (S_i), (u_i))$, тоді наша гра буде формалізована таким чином:

$$u_к(T) = \begin{cases} CK, T \subset K \\ 0, CO \\ PN, в\ інших\ випадках \end{cases}, \quad (1)$$

де *CK* – розподіл доходу залежно від обсягів прибутку коаліції; *CO* – виконання умов контракту гравцями без участі у коаліції; *PN* – штраф за невиконання умов контракту, котрий розраховують за [1].

Вирішенням цієї гри буде елемент з ядра $C(V)$, яке являє собою множину усіх недомінованих розподілів коаліційної гри *V*, що має властивості ефективності та раціональності. Очевидно, що у разі взаємодії РЕР між собою буде наявний певний невід'ємний прибуток, разом з тим, якщо гравець не бере участі у коаліції, він буде змушений сплатити штраф за невиконання умов контракту.

Висновки: У такій постановці задачі оптимізації взаємодії різнотипних РЕР кожний із типів гравців у разі своєї раціональності буде намагатися уникнути штрафу за невиконання умов контракту, що підвищить загальний прибуток агрегованих РЕР.

ПОСИЛАННЯ

1. Дерев'янко, Д. Швірські К. 2024. Побудова моделей оптимальної взаємодії джерел розосередженої генерації та систем акумулювання енергії у межах Microgrid систем. Технічна електродинаміка. 1 (Січ 2024), 053. DOI:https://doi.org/10.15407/techned2024.01.053.
2. M. Lotfi, P.S. Jo˜ao Catal˜ao, M.S. Javadi, A.E. Nezhad, M. Shafie-khah, Demand response program implementation for day-ahead power system operation, in: 2019 IEEE Milan PowerTech, 2019, pp. 1–6, https://doi.org/10.1109/PTC.2019.8810850.
3. E. Mashhour, S.M. Moghaddas-Tafreshi, Bidding strategy of virtual power plant for participating in energy and spinning reserve markets—Part I: problem formulation, IEEE Trans. Power Syst. 26 (2) (2011) 949–956, https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2070884

УДК 621.311.29

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОЕКТУ АЛЬТЕРНАТИВНОГО ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ПАНЕЛЕЙ

Є. І. Гоман[1], О. І. Шматок[2]

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 228-21-28, e-mail: alexshok@ukr.net

У роботі розглянуто практичну реалізацію проєкту альтернативного енергозабезпечення з використанням фотоелектричних панелей. Запропоновано шляхи оптимізації розміщення панелей відповідно до конкретних умов експлуатації електрообладнання і вимог споживача.

Ключові слова: *альтернативне енергозабезпечення, сонячна енергетика, фотоелектричні системи, сонячні панелі, енергетична безпека.*

IMPLEMENTATION OF AN ALTERNATIVE POWER SUPPLY SYSTEM USING PHOTOVOLTAIC PANELS

Y. Goman[1], O. Shmatok[2]

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2a Marii Kapnist Street, Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 228-01-28, e-mail: alexshok@ukr.net

This study presents the practical implementation of an alternative energy supply project based on photovoltaic panels. Strategies for optimizing the placement of the panels are proposed, taking into account the specific operational conditions of the electrical equipment and the requirements of end users.

Key words: *alternative* ***energy supply****, solar energy, photovoltaic systems****,*** *solar panels, energy security****.***

ORCID: [1]0009-0003-3071-424X; [2]0009-0009-2133-2411

З огляду на глобальні виклики, пов'язані з вичерпністю викопних енергоресурсів, розробка й реалізація проєктів у сфері альтернативної енергетики є надзвичайно актуальною. Крім того, в існуючих умовах нестабільності електрозабезпечення в Україні, викликаної руйнаціями генерувальних і мережевих потужностей, актуальною стає диверсифікація джерел енергозабезпечення. Сонячна енергетика є одним з найперспективніших напрямів, який дозволяє забезпечити стабільне, екологічне та довготривале постачання енергії.

Україна має досить сприятливі кліматичні умови використання фотоелектричних систем для сонячної генерації електричної енергії. Так, за різними даними [1, 2], середньорічна інсоляція для м. Києва за різними роками вимірювань та спостережень становить 1200–1550 кВт·год/м². Враховуючи глобальне потепління і зміну клімату слід очікувати сталість або навіть підвищення цих показників, обумовлене збільшенням сонячних днів у році.

Ключовим фактором для досягнення максимальної ефективності генерації електроенергії від фотоелектричних систем є оптимальна орієнтація сонячних панелей. Основними параметрами, що визначають оптимальну орієнтацію, є кут нахилу панелей і напрямок їх орієнтації за сторонами світу, що залежить від географічного положення. Так, наприклад, для Північної півкулі, включно з Україною, оптимальна орієнтація сонячних панелей — південь (азимут 0°), оскільки Сонце рухається небосхилом зі сходу на захід, і максимальна кількість сонячної енергії потрапляє на панелі, орієнтовані на південь. Кут нахилу панелей залежить від широти місцевості. Загалом кут нахилу панелей повинен бути близьким до географічної широти місцевості. Проте для різних сезонів або для забезпечення максимальної потужності в певні пори року кут може бути змінений [3–5]. Правильна орієнтація сонячних панелей дозволяє значно збільшити ефективність роботи фотоелектричних систем, знижуючи витрати та максимізуючи використання сонячної енергії.

Слід зазначити, що, на нашу думку, загальноприйняті оптимальні параметри щодо орієнтації та кутів нахилу сонячних панелей, безумовно можуть бути рекомендовані для будівництва потужних сонячних електростанцій, але не завжди є оптимальними для використання у приватному секторі для забезпечення власних потреб в електроенергії. Це обумовлено розташуванням об'єктів і місць можливого встановлення фотоелектричних систем, а також індивідуальними потребами споживачів. Наприклад, якщо пік використання електроенергії споживачем припадає

на вранішні й вечірні години, то південна орієнтація панелей не буде забезпечувати максимальну потужність споживання у вказані періоди. Цей недолік, безумовно, можливо компенсувати встановленням у системі акумуляторних батарей більшої ємності, але це призведе до здорожчання вартості реалізації проєкту. Доцільним, в певних випадках, на нашу думку, є встановлення сонячних панелей групами, які різноорієнтовані за напрямками, для забезпечення максимальної отримуваної потужності в певні періоди доби. Такий підхід також може видатися доцільним з погляду використання кінцевим споживачем двозонної чи тризонної тарифікації електроенергії для максимального заміщення споживання в години, коли вартість електричної енергії з мережі є найвищою.

Для реалізації нашого проєкту енергозабезпечення з використанням фотоелектричних сонячних панелей було вибрано плоский дах адміністративної будівлі в м. Києві. Для проєктування та моделювання системи встановлених панелей використовувалось хмарне програмне забезпечення HelioScope, розроблене компанією Folsom Labs. Воно широко використовується для швидкого створення макетів фотоелектричних систем і оцінки їхньої енергетичної продуктивності.

Відповідно до вимог кінцевого споживача і результатів моделювання затінення панелей у різні години протягом дня було спроєктовано розташування двох груп сонячних панелей (рис. 1): перша група (36 шт.) – панелі, що орієнтовані у східному й західному напрямках; друга група (18 шт.) – панелі, які орієнтовані в південному напрямку.

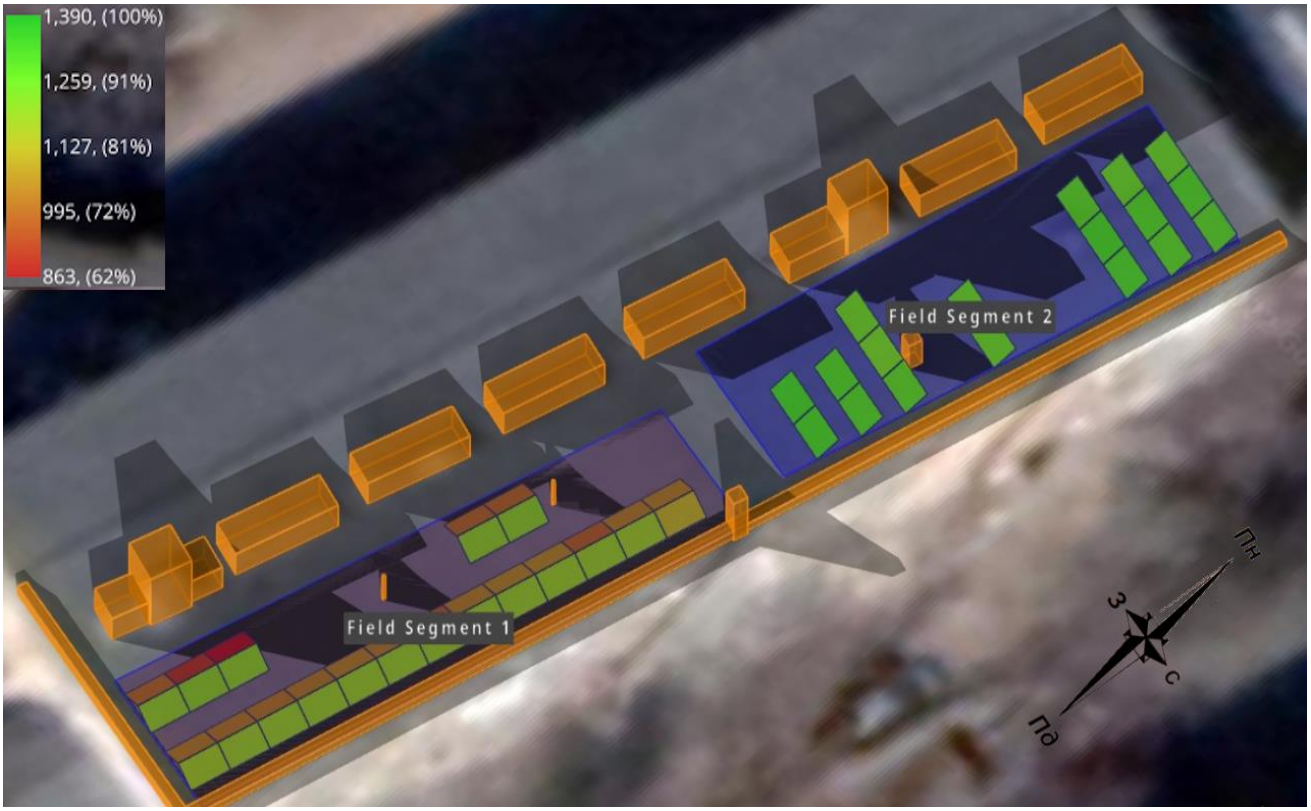


Рис. 1. Розташування сонячних панелей на даху будівлі з відображенням моделювання затінення

Для реалізації проєкту було вибрано фотоелектричні (сонячні) панелі JA Solar JAM60S20-380/MR 380 Wp, Mono виробництва компанії JA Solar Technology Co., Ltd (Китай) потужністю 380 Вт кожна. Заявлений виробником коефіцієнт ефективності таких модулів становить близько 20,2 %. Номінальна потужність усієї системи в цілому, відповідно, станоаить 20,5 кВт. Для передачі електроенергії постійного струму від фотоелектричних панелей використано контролери заряду VictronEnergy SmartSolar MPPT RS 450/100-Tr та Victron Energy SmartSolar MPPT RS 450/200-Tr виробництва компанії Victron Energy B.V. (Нідерланди). Вони забезпечують заряджання двох модульних літій-залізо-фосфатних ($LiFePO_4$) акумуляторних батарей Pylontech US2000C виробництва компанії Pylon Technologies Co., Ltd. (Китай) ємністю 2,4 кВт·год кожна. Для перетворення постійного струму від акумуляторних батарей на змінний струм використовується гібридний інвертор, призначений для автономних та мережевих систем енергозабезпечення Victron Energy Quattro 48/15000/200-100/100. Вказаний інвертор дозволяє доповнювати потужність мережі, використовуючи енергію з батареї під час пікових навантажень, що дає змогу реалізувати потреби кінцевого споживача не лише у прямому використанні електроенергії від фотоелектричних модулів, а й у частковому заміщенні електроенергії з мережі живлення у пікові години навантаження. Крім того, вказаний інвертор дозволяє забезпечувати безперебійне живлення критичних навантажень при відключенні мережі (перемикання менше ніж 20 мс). Система також обладнана засобами керування й моніторингу, які дозволяють забезпечити гнучке управління енергією в різних умовах експлуатації.

Відповідно до вибраної схеми розташування і вибраних фотоелектричних панелей, з урахуванням розрахункового затінення і даних сонячної інсоляції для м. Києва, було проведено розрахунок загальної продуктивності фотоелектричної системи (рис. 2).

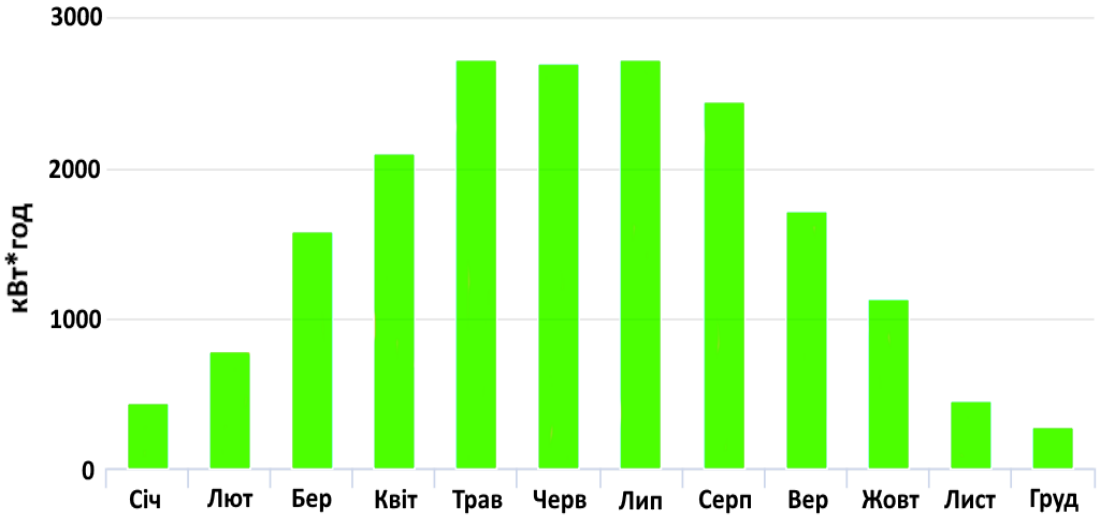


Рис. 2. Розрахункова продуктивність системи за виробленою елекроенергією впродовж року

Очікувано, впродовж року показники продуктивності системи вказують на значне падіння обсягу генерації електричної енергії в осінньо-зимовий період, що обумовлено зниженням тривалості світлового дня й погіршенням метеоумов для забезпечення необхідної інтенсивності сонячної інсоляції. Проте сумарний обсяг отримуваної електроенергії протягом року є досить значним.

Розрахунки, проведені при проєктуванні фотоелектричної системи енергозабезпечення, показали принципову можливість встановлення сонячних панелей з орієнтацією в східному й західному напрямках для забезпечення максимальної отримуваної електричної потужності в пікові вранішні й вечірні години. Хоча, слід зазначити, що загальна кількість отримуваної енергії від орієнтованих таким чином сонячних панелей дещо знижується у порівнянні з панелями, орієнтованими в південному напрямку.

Метою подальшої роботи є експериментальні дослідження експлуатації фотоелектричної системи для визначення оптимальних режимів її роботи. На основі отриманих експериментальних даних планується розробка рекомендацій для оптимізації розташування окремих фотоелектричних панелей та їхніх кутів нахилу для забезпечення максимальної ефективності системи.

Реалізація проєктів із сонячного енергозабезпечення сприяє підвищенню енергетичної незалежності та зміцненню енергетичної безпеки, забезпечуючи диверсифікацію джерел постачання електроенергії для кінцевого споживача та підвищуючи стабільність енергомережі в кризові періоди. В умовах сучасних викликів такі проєкти мають потенціал для масштабування і є не лише доцільними, а й стратегічно необхідними для сталого розвитку України.

ПОСИЛАННЯ

1. Патон Б. Є., Клюй М. І., Коротинський О. Є., Макаров А. В., Трубіцин Ю. О., Ганус В. О. (2014). Результати натурних вимірювань інтенсивності сонячного випромінювання в м. Київ. Доповіді НАН України, 2014 (8). https://doi.org/10.15407/dopovidi2014.08.077
2. Drozd, S., & Kussul, N. (2024). Solar energy potential mapping in Ukraine through integration of GIS, remote sensing, and fuzzy logic. European Journal of Remote Sensing, 57(1). https://doi.org/10.1080/22797254.2024.2362390
3. Naraghi, M. H., & Atefi, E. (2022). Optimum Solar Panel Orientation and Performance: A Climatic Data-Driven Metaheuristic Approach. Energies, 15(2), 624. https://doi.org/10.3390/en15020624
4. de Luis-Ruiz, J. M., Salas-Menocal, B. R., Pereda-García, R., Pérez-Álvarez, R., Sedano-Cibrián, J., & Ruiz-Fernández, C. (2024). Optimal Location of Solar Photovoltaic Plants Using Geographic Information Systems and Multi-Criteria Analysis. Sustainability, 16(7), 2895. https://doi.org/10.3390/su16072895
5. Naraghi, M. H., & Atefi, E. (2024). An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems. Journal of Engineering Research, 2024. https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.07.015

УДК 621.3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕРМОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ НА ОСНОВІ СПЛАВУ NI-TI ПРИ РІЗНІЙ ДЕФОРМАЦІЇ ПРУЖИНИ ДЛЯ ЇХ ВИКОРИСТАННЯ В ТЕПЛОВИХ ДВИГУНАХ

***В. Я. Бунько*[1]**

[1]Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», вул. Академічна, 20, м. Бережани, 47501, Україна,
тел.: (097) 451-97-01, e-mail: VBunko@gmail.com

У цій статті розглядається дослідження термомеханічних характеристик функціональних сплавів на базі сплаву Ni-Ti (нітінол) при різних деформаціях довжини пружин. При обробці експериментальних досліджень використовуються методи теоретичного аналізу на основі закономірностей впливу електротеплових та термомеханічних властивостей функціональних сплавів з явищами ефекту пам'яті форми. Такі елементи потенційно можуть бути використані в тепловому двигуні для створення енергоефективної установки для генерації електричної енергії при використанні вторинного джерела тепла.

Ключові слова: *термомеханічні характеристики, генерація електричної енергії, тепловий двигун, енергоефективна установка.*

INVESTIGATION OF THERMOMECHANICAL CHARACTERISTICS OF ELEMENTS BASED ON NITINOL ALLOY AT DIFFERENT DEFORMATION OF SPRING FOR THEIR USE IN HEAT ENGINES

***V. Bunko*[1]**

[1]Separate subdivision of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine "Berezhan Agrotechnical Institute",
St. 20 Akademichna St., Berezhany, 47501, Ukraine
phone: (097) 451-97-01, e-mail: VBunko@gmail.com

This article deals with the study of thermomechanical characteristics of functional alloys based on Ni-Ti alloy (nitinol) under various deformations of spring length. When processing experimental studies, methods of theoretical analysis are used on the basis of patterns of influence of electrothermal and thermomechanical properties of functional alloys with phenomena of shape memory effect. Such elements can potentially be used in a thermal engine to create an energy efficient installation for generating electrical energy using a secondary heat source.

Key words: *thermomechanical characteristics, electric power generation, heat engine, energy efficient installation.*

ORCID: [1]0000-0002-9403-8135

Функціональні сплави з ефектом пам'яті форми (ЕПФ) завдяки їх особливим властивостям дедалі більше застосовуються при створенні різного роду датчиків, приводів та регуляторів. Однією з основних особливостей сплавів з ЕПФ є здатність ефективно перетворювати низькотемпературну теплову енергію з показником температури середовища 20…40 °С на механічну роботу, а далі – на електричну енергію.

Сплави з пам'яттю форми (SMA) належать до класу матеріалів з пам'яттю форми (SMM), які мають здатність «запам'ятовувати» або зберігати свою попередню форму під впливом певних факторів, таких як термомеханічні або магнітні коливання. У роботі [1] описуються властивості SMA, які роблять їх ідеальними для приводів у різних установках, а також розглядаються пов'язані з ними обмеження, щоб пояснити проблеми проєктування, з якими зустрічаються розробники SMA.

Головним компонентом таких пристроїв є комбінація активного елемента зі сплаву з ЕПФ, що генерує переміщення при підвищенні температури, і протидіючого елемента з протилежного боку, що повертає активний елемент в початкове положення при охолодженні. Приводи, які виготовлені за таким принципом, відрізняються компактністю,

простотою виготовлення, надійністю спрацювання, низьким рівнем шуму та відсутністю кидків. Такі елементи можуть бути використані в тепловому двигуні, проте для оцінки ефективності такої установки необхідно вирішити дачу, що пов'язана з дослідженням термомеханічних характеристик цих елементів.

Тепловий двигун зі сплаву з пам'яттю форми (SMA) з нітинолом (NiTi) є дуже перспективною енергоустановкою на застосування SMA з моменту його винаходу, але ще не буде комерційним через його низьку ефективність і продуктивність. У статті [2] представлено огляд різних типів теплових двигунів NiTi SMA. Огляд виконується на основі таких заголовків: концептуальний дизайн, основна модель двигуна, продуктивність двигуна та обмеження двигуна. Такі фактори, як температура, швидкість охолодження, розмір елемента NiTi SMA та коефіцієнт розтягування пружини NiTi SMA, були визначені як визначальні чинники кінцевої вихідної потужності та ефективності теплових двигунів SMA [2].

Найпоширенішим матеріалом з пам'яттю форми є нітінол, який завдяки винятковому сполученню функціональних властивосте, характеризується, зокрема, пластичністю, міцністю, корозійною стійкістю та біосумісністю [3].

У цьому дослідженні вибрано термочутливий елемент – пружина із сплаву Nitinol. Пружина виготовлена з проводу довжиною 280 мм і діаметром 1 мм, діаметр цих пружин – 10 мм, кількість витків – 9. За умовою досліджень вибрана величина попередньої деформації (розтягування) пружин до 100, 110, 120, 130, 140, 150 і 160 мм.

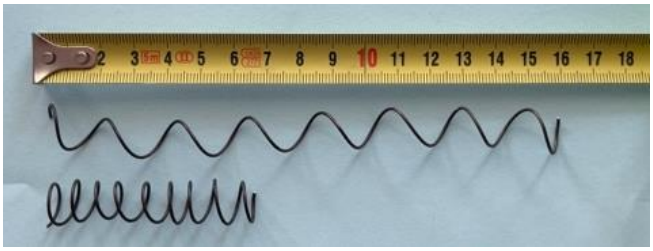


Рис. 1. Фрагмент деформованої пружини з проводу сплаву Nitinol діаметром 1,0 мм

Варто зазначити, що даний сплав Nitinol у вигляді пружини (рис. 1) має температуру початку відновлення форми в інтервалі +50…+55 °С, температура завершення відновлення форми залежить від деформації пружини і лежить в інтервалі від +85 до +95 °С.

При нагріванні пружина стискається, і в цілях спрощення розрахунків припускали, що провід, з якого виготолена пружина, працює тільки на кручення, тобто зусилля F, яке прикладене до пружини, викликає дотичне напруження τ:

$$\tau = \frac{8D}{\pi d^3} F, \qquad [1]$$

де D – середній діаметр витка, а d – діаметр проводу. Це рівняння відповідає лінійному розподілу дотичних напружень по радіусу, при якому τ рівне максимальному дотичному напруженню. Характер розподілу напружень в пружині з Ni-Ti залежить від температури теплового агента.

Термомеханічна характеристика пружини зі сплаву з ЕПФ (матеріал пружини – нітінол, провід діаметром 1,0 мм) та відповідні температурні точки і зусилля показані на рис .2.

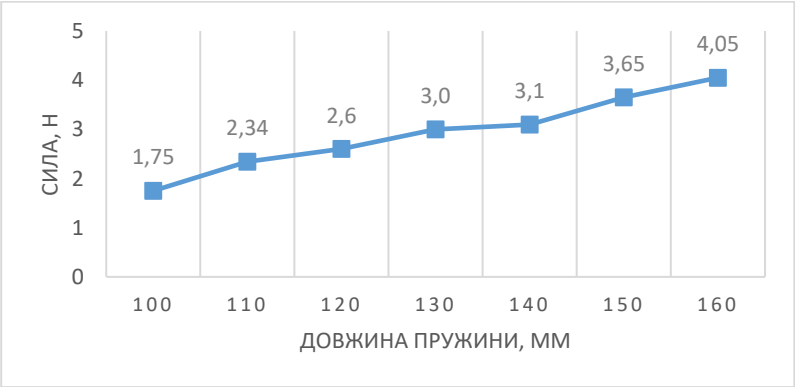


Рис. 2. Термомеханічна характеристика термочутливих елементів зі сплаву з ЕПФ на основі нітінолу (Ni-Ti) при деформації

Як видно з графіків термомеханічних характеристик, істотний вплив на генероване зусилля робить величина попередньої деформації пружини від 100 до 160 мм. При деформації пружини 160 мм і температурі 100 ^{o}C зусилля становить 4,05 Н, а при деформації 100 мм – 1,75 Н.

Отже, така залежність практично має лінійну характеристику і дає підстави зробити висновок, що при збільшенні деформації пружини та температури реактивне зусилля зростає. Тому функціональні сплави мають потенційну властивість бути застосованими в теплових двигунах при використанні вторинних джерел теплоти, а це дає підстави для створення енергоефективних установок для систем генерації електричної енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Jaronie Mohd Jani, Martin Leary, Aleksandar Subic, Mark A. Gibson, A review of shape memory alloy research, applications and opportunities, Materials & Design (1980-2015), Volume 56, 2014, Pages 1078–1113. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084
2. Abubakar R. A., Wang F., Wang L. A review on Nitinol shape memory alloy heat engines. (2020). Smart Materials and Structures, 30(1), art. no. 013001. DOI 10.1088/1361-665X/abc6b8
3. Козирський В. В., Бунько В. Я. Експериментальні дослідження термомеханічних характеристик пружин із сплаву nitinol. Енергетика і автоматика. №3. 2024. С. 155–165. DOI: http://dx.doi.org/10.31548/energiya3(73).2024.155

УДК 620.97

ПРОСТОРОВА ДОСТУПНІСТЬ СИСТЕМ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ПРОСТОРОВИЙ АНАЛІЗ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

О. О. Савченко[1], Ю. С. Юркевич[2]

Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна,
тел.: (050) 868-18-14, e-mail: olena.o.savchenko@lpnu.ua

При розробці схем систем теплопостачання доцільно мати інформацію про просторову доступність систем централізованого теплопостачання та просторовий аналіз відновлювальних джерел енергії.

Ключові слова: *система централізованого теплопостачання, схема системи теплопостачання, відновлювальні джерела енергії, просторова доступність, просторовий аналіз.*

SPATIAL ACCESSIBILITY OF DISTRICT HEATING SYSTEMS AND SPATIAL ANALYSIS OF RENEWABLE ENERGY SOURCES

O. O. Savchenko[1], Yu. S. Yurkevych [2]

Lviv Polytechnic National University,
12 St. Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013
phone: (050) 868-18-14, e-mail: olena.o.savchenko@lpnu.ua

When developing district heating system schemes, it is advisable to have information about the spatial accessibility of district heating systems and spatial analysis of renewable energy sources.

Key words: *district heating system, heating system scheme, renewable energy sources, spatial accessibility, spatial analysis.*

ORCID: [1]0000-0003-3767-380X; [2]0000-0002-8869-7759

Системи централізованого теплопостачання розглядаються у Європейському Союзі як шлях для досягнення амбітної мети нульових викидів парникових газів до 2050 року відповідно до Зеленої Угоди [1]. І хоча в Україні орієнтовно 50 % споживачів користуються послугами централізованого теплопостачання, проте через зношеність мереж, експлуатації застарілого обладнання, проблем з регулюванням відпуску теплоти, ця частка з кожним роком зменшується [2]. Крім того, бойові дії на території України призвели до пошкодження та руйнування обладання для генерації, розподілу і транспортування теплоти [3]. Тому, при відбудові енергетичної галузі України доцільно впроваджувати централізовані системи теплопостачання, зокрема системи теплопостачання 4 покоління (4GDH), які характеризуються використанням відновлювальних джерел енергії, низькотемпературних теплоносіїв, обладання для акумуляції теплової енергії, пристроїв для регулювання параметрів теплоносія.

Для довгострокового планування системи теплопостачання населеного пункту здійснюють розробку схеми теплопостачання [4]. Основними показниками для розробки схем теплопостачання є густина теплового потоку на 1 квадратний кілометр забудови, наявність (можливість створення) джерел теплової енергії, стан існуючої системи теплопостачання, необхідні інвестиції на будівництво чи реконструкцію об’єктів газо-, електро- та водопостачання для приєднання до них додаткових потужностей споживачів [4]. Схеми теплопостачання в Україні рекомендується розробляти для населених пунктів з населенням понад 20 тис. мешканців.

Основою для розробки схем централізованого теплопостачання може стати інформація про просторову доступність систем централізованого теплопостачання в регіонах України. Просторова доступність є ключовим фактором, який впливає на можливість жителів певної території користуватися певними послугами, зокрема системою централізованого теплопостачання. Завдяки інформації про просторову доступність систем теплопостачання споживачі зможуть приєднатися до теплових мереж та користуватися тепловою енергією для потреб систем опалення та постачання гарячої води.

Розроблена оптимальна схема системи теплопостачання повинна максимально залучати для виробництва теплової енергії місцеві відновлювальні та вторинні енергетичні ресурси. Це сприятиме декарбонізації систем теплопостачання та енергетичній незалежності країни. Визначення пріоритетних видів енергетичних ресурсів для виробництва теплової енергії в регіонах України дозволить просторовий аналіз відновлювальних джерел енергії.

Інтегрування інформації про енергоефективність житлових та громадських будинків, соціально-економічні показники населеного пункту, наявність відновлювальних енергетичних ресурсів дозволить розробити регіональну та національну карту просторової доступності системи централізованого теплопостачання та відновлювальних джерел енергії для населення. Така карта дозволить визначити територіальні громади, де централізоване теплопостачання доступне, недоступне або неефективне, та надасть відомості щодо можливого використання відновлювальних джерел енергії для генерації теплової енергії.

Для Львівської області була спроба провести просторовий аналіз деяких відновлювальних джерел енергії, зокрема сонячної енергії, енергії вітру, деревної біомаси та каналізаційних стоків [5]. На рис.1 показано ресурси сонячної енергії для кожної територіальної громади Львівщини, за значенням річного опромінення під кутом нахилу 35° у кВт·год/(м^2·рік).

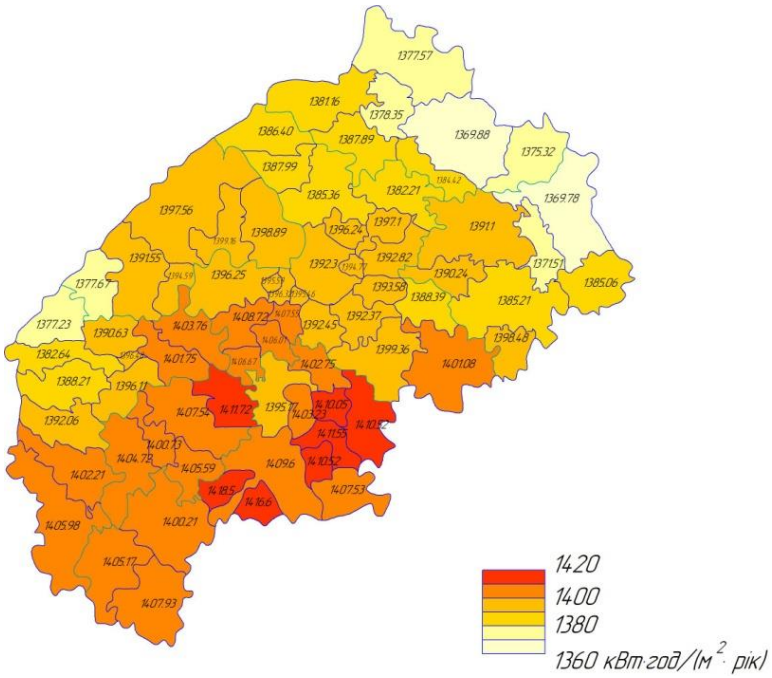


Рис. 1. Річна кількість сонячного опромінення, кВт·год/(м^2·рік), яка надходить на 1 м^2 закріпленої під кутом 35° поверхні, у територіальних громадах Львівщини

Просторовий аналіз відновлювальних джерел Львівщини дозволив визначити відсутність даних щодо наявного потенціалу біомаси, зокрема деревини, гною сільськогосподарських рослин, відходів рослинництва та лісопереробки, тощо, які можуть бути використані для виробництва теплової енергії. Встановлено, що найперспективнішим районом за наявності відновлювальних джерел енергії у Львівській області є Стрийський район, оскільки кількість сонячного випромінювання та кількість земель лісового фонду у ньому є вищими за ці ж показники для інших районів, крім того, кількість осаду стічних вод також є одним з найвищих у області. У Львівській області є 13 міст з населенням понад 20 тис. жителів, в яких доцільно використовувати системи централізованого телпопостачання, а, відповідно, розробляти схеми систем теплопостачання.

ПОСИЛАННЯ

1. Schweiger G., Kuttin F., Posch A., 2019. District Heating Systems: An Analysis of Strengths, Weak-nesses, Opportunities, and Threats of the 4GDH. Energies, 12, 4748.
2. Савченко О., Юркевич Ю., Возняк О., 2024. Оцінка можливості впровадження низькотемпературних систем централізованого теплопостачання в Україні. Екологічна безпека та природокористування, 1 (49), 17–33.
3. Савченко О., 2023. Підвищення енергетичної ефективності будівель в умовах відновлення та відбудови шляхом впровадження централізованих систем теплопостачання. Наука та будівництво, 38 (4), 41-48.
4. Керівництво з розробки схем теплопостачання. Проект енергетичної безпеки (ПЕБ), жовтень 2021 року. URL: https://energysecurityua.org/wp-content/uploads/2021/12/HSS_Manual_UKR-1.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
5. Savchenko O., Yurkevych Y., Liubuska I., 2023. Spatial analysis of renewable energy sources in Lviv region. Energy Engineering and Control Systems, 9(1), 22–30.

УДК 66.047; 664.8.047

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СУШИЛЬНІ УСТАНОВКИ НА ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛАХ ЕНЕРГІЇ

Ю. Ф. Снєжкін

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03680, Україна
тел.:(095) 363-50-76, e-mail: 1snezhkin@gmail.com

Розглядається створення енергоефективних сушарок, у яких підігрів теплоносія здійснюється за допомогою компресійних або сорбційних теплових насосів, геотермальної енергії або сонячної енергії.

Ключові слова: *конвективна сушарка, теплоносій, тепловий насос, водяна пара, геотермальні води, сонячна радіація.*

ENERGY-EFFICIENT DRYING PLANTS POWERED BY RENEWABLE ENERGY SOURCES

Yu. Sniezhkin

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (095) 363-50-76, e-mail: 1snezhkin@gmail.com

The company is considering the creation of energy-efficient dryers in which the heating medium is heated by compression or sorption heat pumps, geothermal energy, or solar energy.

Key words: *autonomous installation, active condensation method, air humidity, obtaining water from air, "dew point" temperature.*

ORCID: 0000-0002-9049-3392

Сушіння належить до одного з найважливіших масообмінних процесів у різних галузях промисловості. Об’єктами сушіння можуть бути різні матеріали на різних стадіях їх переробки (сировина, полуфабрикати, готові вироби).

Аналіз енергетичних та екологічних показників сушильних установок в Україні показує, що процеси сушіння достатньо енергоємні й екологічно небезпечні. На їх проведення витрачається близько 10 % кінцевого споживання енергоресурсів промисловістю, населенням, транспортом, сектором послуг та сільським господарством. При цьому тільки в промисловості на процеси сушіння витрачається близько 28 % усієї енергії. Великі витрати енергії на процеси сушіння обумовлені стрімким розширенням асортименту й об’єму зневоднюваних матеріалів. Тому створення високоефективних сушильних установок, які відповідають сучасному рівню науки й техніки, має важливе значення [1].

Одним з найперспективныших напрямів розвитку світової енергетики є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що знімає ряд проблем, які виникають у процесі функціонування традиційної енергетики, зокрема щодо шкідливого впливу на навколишнє середовище. Серед комплексу питань щодо широкого впровадження обладнання на основі ВДЕ ключовими є питання суттєвого покращення техніко-економічних показників існуючого енергетичного обладнання, створення і впровадження нових установок і технологій [2].

Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності сушильного обладнання є оснащення конвективних сушарок енергоефективними системами підготовки сушильного агента з використанням ВДЕ. В Інституті на основі комплексу аналітичних і експериментальних досліджень розроблені основи теплофізичних процесів тепловологого переносу при зневодненні різних матеріалів та створені ефективні сушильні установки з використанням теплових насосів (ТН), геотермальної та сонячної енергії. ТН за своїм принципом дії добре пристосований до інтеграції в процес конвективного сушіння, оскільки низькопотенційна теплота, яка необхідна для його роботи, утворюється в самій сушарці, це відпрацьований теплоносій.

Відпрацьовані сушильні агенти, які виходять з сушарок, мають значну ентальпію, що обумовлює доцільність використання їх як ВДЕ. Важливо враховувати, що відпрацьовані теплоносії мають у своєму складі значну кількість водяної пари, при конденсації якої утворюється теплота при високих значеннях коефіцієнта теплообміну. Так, наприклад, приріст ентальпії відпрацьованого теплоносія за рахунок його теплоти становить для зерносушарок різних типів приблизно 2000 –8400 тис. кДж/год. Тому розробка і впровадження сушарок з ТН дозволяє значно підвищити їх енергоефективність.

Водяна пара, як відомо,належить до парникових газів і в процесах сушіння, за нашими підрахунками, в навколишнє середовище України надходить її близько 18 млн т. Водяна пара, яка конденсується у випарнику ТН у вигляді структурованої води, практично екологічно безпечна, що забезпечує екологічну чистоту сушарки. Коли відбувається конденсація водяної пари з сільгоспсировини, то це клітинна вода рослин, яка має лікувальні та оздоровчі властивості [1].

Вибір типу теплового насоса (сорбційний або компресійний) для конкретного проєкту конвективної сушарки залежить від багатьох факторів, але вирішальним зазвичай є наявність певного виду енергоресурсів – електрики, теплової енергі, або альтернативних джерел енергії. Тому під час розрахунку технологічних схем з різними типами теплових насосів враховують не тільки енергетичну ефективність робочого циклу теплового насоса, але й споживання первинного палива, яке витрачається для отримання цієї енергії. Переважна більшість сушарок пов’язана із застосуванням парокомпресійних теплових насосів з електроприводом для низькотемпературних процесів сушіння через їхнє найбільше поширення та простоту організації систем з їхнім використанням. Можливість знижувати вологовміст сушильного агента під час низькотемпературного сушіння термолабільних матеріалів сприяє інтенсифікації вологовидалення за рахунок підвищення масообмінного напору між теплоносієм і матеріалом. Крім того, технологія сушіння з тепловим насосом забезпечує зниження питомих енерговитрат шляхом керованого осушення теплоносія [3]. В Інституті створені камерні, тунельні, стрічкові і розпилювальні сушарки з використанням ТН, які мають витрати енергії на 1 кг випареної вологи значно менше існуючих на сьогодні аналогічних сушарок на традиційних джерелах енергії.

До ВДЕ належить геотермальна енергія, тобто енергія тепла Землі. Основним джерелом цієї енергії є постійний потік теплоти з розжарених надр, спрямований до поверхні землі.

Запаси геотермальної енергії становлять приблизно 8 х 1030 Дж за рік; ця кількість перевищує річне споживання енергії в усьому світі приблизно в 35 млрд разів [4].

В Інституті розроблені сушарки, які використовують для нагріву теплоносія, – низькотермальні (Т = 30–70 ℃) і середньотермальні (Т = 70–100 ℃) геотермальні води. Створено сушарку з абсорбційним тепловим насосом, який використовує геотермальну енергію і здійснює тепловологу обробку теплоносія за допомогою розчинів неорганічних солей, що гарантує не тільки високу енергоефективність, а й санітарно-гігієнічний ефект – бактеріцидну його обробку.

Перевагою абсорбційних ТН є використання розчинів неорганічних солей в системах осушення, що дає змогу утилізації в ТН теплоти сорбції, яка видалена з теплоносія вологи, що значно знижує витрати енергії на процес сушіння.

Сонце – гігантський термоядерний реактор, який працює на водні й щосекунди шляхом плавлення переробляє 564 млн т водню на 560 млн т гелію. Втрата 4 млн т маси дорівнює 91 х 109 ГВт-год енергії (1 ГВт дорівнює 1 млн кВт); за 1 с виробляється енергії більше, ніж 6 млрд АЕС смогли б виробляти за рік. Завдяки захисній оболонці атмосфери лише частина цієї енергії досягає поверхні Землі [2].

Значна частина території України характеризується середньою інтенсивністю радіації. За реальних умов хмарності річний прихід сумарної сонячної радіації перебуває на рівні 1050–2250 кВт·год /м2 при загальному збільшенні з півночі на південь. При цьом, внесок розсіяної радіації становить 40–50 % [4].

Сонячне випромінювання не лише створює сприятливі для всього живого умови існування – людина з давніх-давен поставила його енергію собі «на службу».

Сонячне сушіння сільськогосподарських продуктів широко використовується в багатьох країнах світу, оскільки реалізація цього способу зневоднення не потребує високих капітальних та експлуатаційних витрат, а також сонячне сушіння безпечне для навколишнього середовища.

Тривалість зневоднення при сонячному сушінні залежить від властивостей продукту, що висушується, та умов проведення процесу і зазвичай становить 3-4 дні. Для деяких матеріалів тривалість сушіння може досягати тижня, що негативно позначається на якості кінцевого продукту. Також недоліком сонячного сушіння є переривання процесу на час відсутності сонячної радіації. Так, за перший світловий день з високовологих матеріалів видаляється менше 50 % вологи. Досягнутий при цьому вологовміст матеріалу значно перевищує рівноважний з навколишнім середовищем, і в разі переривання процесу сушіння на поверхні продукту створюються умови для прояву мікробіологічної активності, що призводить до псування продукту й погіршення його якості [5].

Оскільки надходження сонячної радіації, яка є єдиним джерелом енергії при сонячному сушінні, нерівномірне протягом доби, то для забезпечення безперервного процесу сушіння ефективно використовувати акумулювання теплової енергії. Серед різних методів акумулювання найпривабливішим є акумулювання з використанням теплоти фазового переходу матеріалів. Перевагою теплоакумулювальних матеріалів з фазовим переходом є їхня здатність забезпечувати високу густину акумулювання енергії за постійної температури, яка відповідає температурі фазового переходу речовини [6].

У разі застосування сонячної сушарки з акумулятором теплової енергії тривалість сушіння скорочується в 1,5–1,7 раза, а за рахунок безперервного процесу продукт, що зневоднюється, не псується, і якість його не погіршується. Майже всі розроблені сушильні установки з використанням ВДЕ впроваджені й підтвердили високу енергоефективність під час експлуатації.

ПОСИЛАННЯ

1. Y. Sniezhkin, Z. Petrova. Energy Consumption Environmental Aspects of Drying Processes Science and Innovation. 2023, 19(2), 44-55 https://doi.org/10.15407/scine 19.02.044.
2. О .І. Соловей, Ю. С. Лєга, В. П. Розен, О. О. Ситник, А. В. Чернявський, Г. В. Курбака. Нетрадиційні та поновлювані джерела енергії: Навчальний посібник / за ред. О. І. Солов'я. Черкаси.:4ДТУ, 2007, 484 с. ISBN 978-966-402-021-0.
3. Ю. Ф. Снєжкін, Сюн Цзян, Д. М. Чалаєв, М. М. Уланов, Н. О. Дабіжа. Енергозберігаючі технології сушіння термолабільних матеріалів. Збірник тематичних статей. Енергоефективність процесів сушіння. Том 2. / за ред. Ю. Ф. Снєжкіна, Р. О. Шапар. К.: ТОВ Про Формат, 2021. 268 с. ISBN 978-617-7894-28-4.
4. С. О. Кудря. Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. Підручник. К.:НТУУ. КПІ, 2012. 490 с. ISBN 978-966-622-521-7.
5. Ю. Ф. Снєжкін, Д. М. Чалаєв, В. А. Михайлик, Н. О. Дабіжа, Т. В. Корінчевська. Застосування акумулювання теплової енергії в системах сопочного сушіння. Збірник тематичних статей. Енергоефективність процесів сушіння. Том 2 / за ред. Ю. Ф. Снєжкіна, Р. О. Шапар. К.: ТОВ Про Формат, 2021. 268 с. ISBN 978-617-7894-28-4.
6. Т. В. Корінчевська. Перспективні методи акумулювання теплової енергії. Наукові праці ОНАХТ. 2010, вип. 37. С. 236–241.

УДК 536.551.621

ПРОЕКТ CTS:
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ТРАНСПОРТУВАННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ CO_2 У ЧОРНОМУ МОРІ

Ю. В. Демчук[1], А. Дуду[2], Р. Беренблюм[3], І. В. Віршило[4], М. М. Курило [5]

[1]ГО "Геотермал Україна", вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна, тел.: +380935314620, email: y.demchuk@geothermalukraine.org

[2] Національний інститут досліджень і розвитку морської геології та геоекології – GeoEcoMar, Бухарест, Румунія, alexandra.dudu@geoecomar.ro

[3] Норвезький дослідницький центр NORCE, Норвегія, robe@norceresearch.no

[4] АТ «Укргазвидобування» (УГВ), Група Нафтогаз, Київ, Україна, ivan.virshylo@ugv.com.ua

[5] Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Київ, Україна, mvirshylo@gmail.com

Традиційні підходи до офшорного зберігання CO_2 вимагають значних капіталовкладень. Водночас деякі галузі промисловості стикаються з технологічними обмеженнями у скороченні викидів, що робить необхідним використання технологій уловлювання, використання та зберігання вуглецю (CCUS) для нейтралізації викидів CO_2, навіть за високої енергоефективності виробництва. Проєкт CTS спрямований на дослідження можливості застосування інноваційного рішення NEMO, яке передбачає використання суден для прямого закачування CO_2 та його подальшого довгострокового зберігання на шельфі. Це дозволить розкрити потенціал CCUS і сприятиме прискоренню впровадження відповідних технологій. Одним із ключових напрямів дослідження є Чорноморський сценарій, що розглядає перспективи співпраці між Румунією та Україною у сфері реалізації CCS-рішень.

Ключові слова: *пряме закачування CO_2, NEMO рішення, офшорне зберігання CO_2, Чорне море, інноваційна технологія, енергоефективність*

CTS PROJECT:
ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS FOR CO2 TRANSPORT AND STORAGE IN THE BLACK SEA

Y.V. Demchuk[1], A. Dudu[2], R. Berenblyum[3], I. Virshylo[4], M. Kurylo[5]

[1] NGO "Geothermal Ukraine", 15 Karpatska Str., Ukraine, 76000, Ivano-Frankivsk city, email: y.demchuk@geothermalukraine.org

[2] National Institute for Research and Development on Marine Geology and Geo-ecology – GeoEcoMar, Bucharest, Romania, alexandra.dudu@geoecomar.ro

[3] Norwegian Research Center NORCE, Norway, robe@norceresearch.no

[4] Ukrgasvydobuvannya JSC (UGV), Naftogaz Group, Kyiv, Ukraine, ivan.virshylo@ugv.com.ua

[5] Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine, mvirshylo@gmail.com

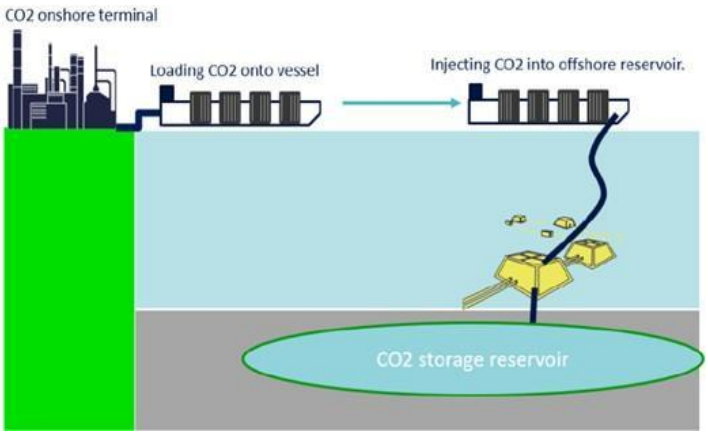
Conventional offshore CO_2 storage solutions require extensive and costly infrastructure with a significant spatial footprint. Certain industrial sectors face technological limitations in reducing emissions, making Carbon Capture, Utilisation, and Storage (CCUS) technologies essential for mitigating CO_2 emissions, even with high energy efficiency. The CTS project aims to assess the feasibility of direct CO_2 ship injection (NEMO solution) for long-term offshore storage, unlocking the potential of CCUS and accelerating the deployment of related technologies. A key focus of the study is the Black Sea scenario, which explores opportunities for collaboration and synergy between Romania and Ukraine in advancing CCS implementation.

Key words: *direct ship injection, NEMO solution, CO_2 storage, Black Sea, innovative technology, energy efficiency*

ORCID: [1]0000-0001-8703-4235, [2]0000-0001-8246-3225, [3]0000-0002-0138-5155

Traditional solutions for offshore storage require large, costly infrastructure with an immense carbon footprint. This hinders the spread of technology, especially for smaller emitters and storage operators. The CTS (CO_2 Transport and Storage directly from a ship: flexible and cost-effective solutions for European offshore storage) team will investigate how using ships as transport and injection vessels based on Nemo Maritime AS technology (Figure. 1) can unlock CCS potential and speed up its deployment.

CTS will study the impact of direct ship injection on the configuration of capture clusters and storage facilities by developing CCS scenarios in four different offshore regions in Europe: Norwegian Continental Shelf, Baltics, Black Sea and Atlantic coast of Portugal. The Black Sea scenario is composed of interlinked Romanian and Ukrainian scenarios.



The Ukrainian base case scenario encompasses both onshore and offshore components. The onshore focus includes the Odesa and Mykolaiv regions with CO_2 emissions and key hubs location, while the offshore segment covers the Ukrainian exclusive economic zone in the Black Sea, where potential CO_2 storage sites have been identified (Figure 2).

The Ukrainian scenario is assessed at regional scale and includes 1.26 Mt CO_2 emissions from two southern regions - Odesa and Mykolaiv, which has significant industrial development and good seaport infrastructure, with reported quantity of CO_2 emissions as 0.72 Mt and 0.54 Mt respectively in 2023.

Pivdennyi and Mykolaiv maritime ports are being considered as strategic CO_2 hubs for Odesa and Mykolaiv regions, respectively. Their advanced infrastructure includes deep-water berths, high-capacity cranes, conveyors, specialized liquid cargo facilities and extensive storage. Efficient rail and road connections support seamless logistics, reinforcing their role in CO2 transport and storage. CO2 will be transported to offshore storage sites in the Black Sea, with the geological formations suitable for long-term sequestration. The reservoirs have been identified in gas and gas condensate fields (Holitsyna, Arkhangelske, Shtormove) confined to the Karkinite-North Crimean depression. Gas and gas condensate reservoirs, which are considered as potential CO2 storages, primarily referred to Oligocene-Lower Miocene (Maykop series) and Lower Paleocene formations, consist of clay-rich, carbonate (limestones, marls) and terrigenous (sandstones) sediments with porosity ranges from 20 to 30 % at depth from 900 m and up to 2500 m. For these hydrocarbon fields, estimation of storage capacity has been made considering only the most suitable reservoirs. The total preliminary theoretical CO2 storage capacity was estimated at 9.39 Mt.

Ukraine's three regional scenarios are evaluated, each showcasing a unique approach to CO2 transportation: (I) construction of a combined onshore and offshore pipeline system connecting the hubs in the Odesa and Mykolaiv regions to a proposed offshore platform; (II) conventional ships approach to transport CO2 from the hubs to the offshore platform; and (*III)* direct ship CO2 injection (NEMO ship solution).

Incomplete subsurface data lead to uncertainty of CO2 storage capacity. Through techno-economic analysis, the direct CO2 ship injection into the seabed (NEMO solutions) will be compared with the conventional solution of pipelines and ship-based CO2 transport and offshore platforms for injection.

REFERENCES

1. T. Vangkilde-Pedersen et al., "Assessing European capacity for geological storage of carbon dioxide-the EU GeoCapacity project," *Energy Procedia*, Vol. 1, No. 1, pp. 2663–2670, Feb. 2009, https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.034
2. "State Statistics Service of Ukraine," https://www.ukrstat.gov.ua/
3. V. Mykhailov et al., "Unconventional sources of hydrocarbons of Ukraine: monograph. In eight books. Southeastern oil and gas bearing region," (in Ukrainian) in *Analytical Investigations*, Vol. 3, 2014.
4. D. E. Makarenko, "Holitsyna gas condensate field," in Encyclopedia of Modern Ukraine, 2006.
5. M. Pavlyuk and M. Yakovenko, "Oil and gas bearing potential sea areas of the East European Platform," Geology and minerals of the World Ocean, No. 1, pp. 32–46, 2019.

УДК 662.76:662.95(043.2):504.055:536.46

РОЗРАХУНОК СКОРОЧЕННЯ ПАРНИКОВИХ ВИКИДІВ В УМОВАХ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАЛИВА

Б. С. Сорока, В. С. Кудрявцев, В. О. Згурський, Р. С. Карабчиєвська

Інститут газу НАН України,
вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна,
тел.: +380 44 455 5998, e-mail: boris.soroka@gmail.com

Розраховано вплив скорочення витрат палива та викидів парникових газів (CO_2) під час спалювання природного газу (CH_4) залежно від попереднього підігріву повітря-окислювача або збагачення його киснем. Для розрахунків використано обидва ККД циклу Карно: через визначальні температури або теплоти реакцій. Адекватність використаних підходів підтверджена збігом розрахунків з експериментальними даними.

Ключові слова: *витрати палива, водень, декарбонізація, ентальпія повна (хімічна), ККД циклу Карно, парникові викиди, природний газ, температура горіння.*

CALCULATION OF REDUCTION OF THE GREENHOUSE EMISSIONS IN CONDITIONS OF INCREASING THE EFFICIENCY OF FUEL USE

B. Soroka, V. Kudryavtsev, V. Zgurskyi, R. Karabchyievska

The Gas Institute, the NAS of Ukraine,
39, Dehtyarivska St., Kyiv, 03113, Ukraine,
phone: +380 44 455 5998, e-mail: boris.soroka@gmail.com

An impact of lowering the fuel flow rate and reducing the greenhouse gases' (CO_2) emission by natural gas combustion have been determined in dependence on combustion air preliminary preheating and on air – oxidant enrichment with O_2. To obtain the final data, the calculation of Carnot' cycle efficiency alteration has been computed by means both using the temperature or the energy (via total enthalpy) function. The coincidence of theoretical and experimental data has been stated.

Key words: *combustion temperature, decarbonization, fuel flow rate, hydrogen, efficiency of Carnot Cycle, greenhouse emission, enthalpy total (chemical), natural gas.*

ORCID:

B. Soroka ORCID: 0000-0001-9174-0992;
V. Zgurskyi ORCID: 0000-0003-1348-8212;
V. Kudryavtsev ORCID: 0000-0002-5323-4949;
R. Karabchyievska ORCID: 0000-0002-0911-2813

Підвищення ефективності використання палива, що супроводжується скороченням його витрат, є надійним засобом вирішення проблеми збереження оточуючого середовища – її екологічних (скорочення шкідливих викидів) та кліматичних (попередження глобального потепління) аспектів.

З цих позицій гострота проблеми декарбонізації за рахунок відмови від використання органічного палива та переходу до спалювання водню або його сумішей з природним газом суттєво зменшується і не потребує термінового вирішення. За узагальненими даними [1], для нагрівальних печей підвищення ефективності використання палива за рахунок утилізації теплоти продуктів згоряння при використанні рекуперативних (або регенеративних) пальників дозволяє скоротити викиди CO2 з 0,4 до 0,25 кг CO2 / кВт-год (та нижче).

На практиці утилізація теплоти й додавання енергії компонентів горіння на вході в топкову камеру можуть бути реалізовані трьома шляхами:

- підігрів компонентів горіння;
- збагачення повітря горіння киснем;
- підігрів збагаченого повітря (окислювача), зазвичай у високотемпературних печах.

Тут і далі величини, що, на відміну від вихідного (базового) випадку, стосуються альтернативної ситуації, помічені верхнім штрихом.

Розроблено методологію вирішення подібних задач з використанням запропонованих Б. С. Сорокою підходів до заміщення палив, що базуються на збереженні корисної складової енергії Q_{use}, для випадків, що зіставляються:

$$Q_{use} = Q'_{use} \tag{1}$$

Значення останніх розраховується з використанням ККД циклу Карно [2]:

$$\eta_f = 1 - T_2/T_1 = 1 - Q_2/Q_1 \tag{2}$$

$$Q_{use} = Q_1 - Q_2 \tag{3}$$

Отже, розрахунок впливу умов на вході в топкову камеру зводиться до зіставлення зміни B_f з базового значення до зменшеного B_f за умови збереження корисної енергії:

$$B_f \eta_f = B'_f \eta'_f \tag{4}$$

Значення Q_1, Q_2 розраховуються через питомі надлишкові «повні» (хімічні) ентальпії 1 кг продуктів згоряння (СР). Як Q_1 розглядалась підведена в топку енергія СР паливо-окислювальної суміші (FOM) на верхньому температурному рівні (T_1); як Q_2 – викидна енергія СР на виході з топкового простору на нижньому температурному рівні (T_2).

Відповідно до постановки задачі (незмінний склад FOM) вважаємо, що витрати палива з B_f змінюються до B'_f таким чином, що підведена корисна енергія, тобто

$$Q_{1,use} = Q_1 \cdot \eta_f = Q'_1 \cdot \eta_f = \text{const}; \tag{5}$$

$$\delta B_f = 100\Delta B_f / B_f = (1 - B'_f / B_f)100\%; \tag{6}$$

$$\delta B_f = \left(1 - \eta_f / \eta'_f\right) 100\%; \tag{7}$$

$$\delta B_f = \left(1 - \eta_f / \eta'_f\right)100\% = \left(1 - \frac{1 - T_2 / T_1}{1 - T'_2 / T'_1}\right)100\%. \tag{8}$$

Якщо вирішується задача впливу паливо-окислювальної суміші на витрати палива в конкретному агрегаті (топковій системі), то T_2 як робоча температура в топці є незмінним (фіксованим) параметром:

$$T_2 = T'_2 = \text{const} \tag{9}$$

У класі розглядуваних нижче задач під вищім температурним потенціалом T_1 розуміють теоретичну температуру горіння T_T, під нижнім T_2 – температуру на виході з топки T_{fur}, що для умов промислових печей дорівнює технологічній температурі. Якщо топковий процес може схематизуватись реактором ідеального перемішування PSR, то взагалі температура газів є незмінною в усьому обсязі топкової камери (у факелі, СР).

$$Q_1 = I_T - I_0 = I_1 - I_0 = \Delta I_1; \tag{10}$$

$$Q_2 = I_2 - I_0 = \Delta I_2 \tag{11}$$

Відносна економія палива δB_f та скорочення всіх викидів під час спалювання, зокрема $\delta[CO_2]$, – зменшення відносних викидів CO_2 як основного парникового газу становить, внаслідок будь-якої зміни умов на вході в топкову камеру або на виході з печі, в тому числі при рекуперативному підігріві повітря горіння до температури T_a

$$\delta[CO_2] = \delta B_f = \delta Q_1 \tag{12}$$

1. Задача 1. Визначення економії палива δB_f залежно від температури підігріву повітря-окислювача T_a.

На рис. 1 показані залежності $\delta B_f = f(T_a)$. Умови, що варіюються на рис. 1:
- *тип печі та пов'язані з цим температурні параметри (T_2):*
нагрівальна піч виробництва стального прокату – T_2 = 1473K; плавильна піч скловарного виробництва – T_2 = 1823K.
- *спосіб вирішення задачі у відповідності з формулою (2)*: через зміну температури чи визначених теплот.

У першому випадку розрахункове значення δB_f при зміні температури повітря-окислювача з урахуванням (9) становить

$$\delta B_f = \left(1 - \frac{T'_1(T_1 - T_2)}{T_1(T'_1 - T_2)}\right)100\% \tag{13}$$

При використанні зміни підведеної та відведеної теплової енергії (Q_1, Q_2) у разі підвищення температури повітря горіння економія витрат палива може бути розрахована з виразу:

$$\delta B_f = \left(1 - \frac{\Delta I_1'\left(\Delta I_1 - \Delta I_2\right)}{\Delta I_1\left(\Delta I_1' - \Delta I_2'\right)}\right)100\% = \left(1 - \frac{\Delta I_1'\left(I_1 - I_2\right)}{\Delta I_1\left(I_1' - I_2\right)}\right)100\%. \quad (14)$$

При вирішенні задачі 1 $\Delta I_2 = \Delta I'_2$, оскільки в цьому разі при зіставленні розглядаються незмінні температурні умови в печі ($T_2 = T'_2$) та незмінне робоче тіло – повітря-окислювач ($I'_0 = I_0$).

Під час розгляду рис. 1 встановлено, що для випадків процесу горіння підвищення температури робочого (технологічного) процесу в топковій камері (T_2) додатково забезпечує істотне скорочення витрат палива δB_f та викидів CO_2 ($\delta[CO_2]$) при незмінному підігріві повітря (T_a). Таким чином, для скловарної печі підвищення енергетичного потенціалу окислювача набагато цінніше, ніж для нагрівальної печі.

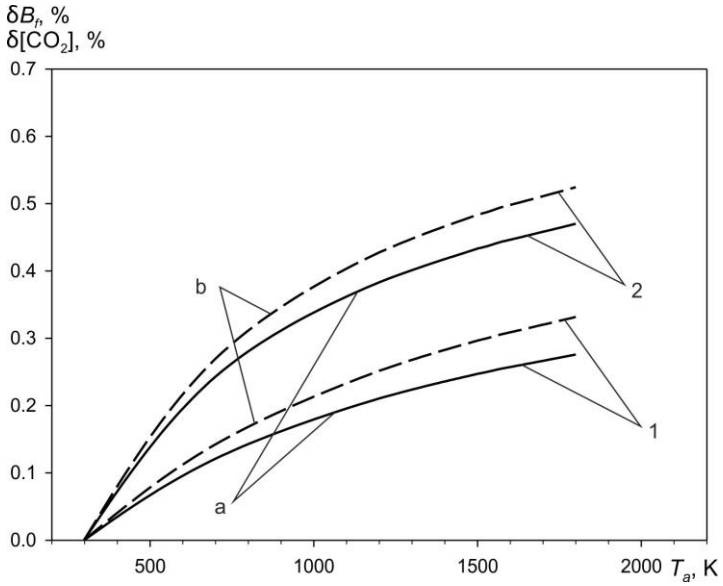


Рис. 1. Залежність економії палива δB_f та скорочення викидів $\delta[CO_2]$ від температури підігріву повітря – окислювача T_a, K.
Паливо – CH_4, окислювач – повітря. T_{fur}, K: 1 – 1473; 2 – 1823.
Піч: 1– нагрівальна, прокатне виробництво; 2 – плавильна, скловарна;
Розрахунки, криві: a – через $T_{CP}(T_1, T_2)$ – суцільна крива; b – через $Q(Q_1, Q_2)$ – пунктирна крива

2. Задача 2. Потенціал FOM підвищується за рахунок збагачення повітря-окислювача киснем $[O_2]_{ox}$. Якісно ця задача збігається з попередньою, оскільки варіювання параметрів: T_a або $[O_2]_{ox}$ – зводиться до зміни T_T та I_1 робочого тіла.

● Розрахункові процедури при оцінці впливу додавання O_2 в окислювач за температурною залежністю (8) або (12), процедури не відрізняються від попередніх. Якщо використовується ентальпійна залежність (14), то треба взяти до уваги, що навіть за фіксованої температури печі ($T_2 = T'_2$) ентальпії $I_2 \neq I'_2$; $\Delta I_2 \neq \Delta I'_2$, оскільки робоче тіло розглядуваного процесу – продукти згоряння – за складом приймаються як рівноважні СР до вихідного складу компонентів: паливо + окислювач – при базовій температурі T_0 (тобто повітряній суміші палива, яка розглядається). Таким чином, при розгляді впливу збагачення окислювача O_2 значення

$$\Delta I'_2 = I'_2 - I_0 \neq I_2 - I_0, \text{ оскільки } I'_0 \neq I_0, \quad (15)$$

де I_0, I'_0 – відповідно, повні ентальпії рівноважних СР повітряної суміші контрольного палива та СР суміші того самого палива з повітрям-окислювачем, збагаченим киснем.

У результаті функціональні зв'язки є подібними при оцінці впливу збагачення повітря горіння киснем та підігріву повітря-окислювача:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial(\delta B_f)}{\partial[O_2]_{ox}} > 0 \\ \dfrac{\partial^2(\delta B_f)}{\partial[O_2]_{ox}^2} < 0 \end{cases} \quad (16) \qquad \begin{cases} \dfrac{\partial[CO_2]}{\partial[O_2]_{ox}} > 0 \\ \dfrac{\partial^2[CO_2]_{ox}}{\partial[O_2]_{ox}^2} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

Розрахункові дані (рис. 2) були порівняні з експериментальними даними, одержаними в процесах нагрівання сталі в печах [3–5]. Як і за нашими даними, найефективнішим є підвищення концентрації кисню в окислювачі з 21 до 30 % (об.), що дає змогу скоротити витрати природного газу на 26,1 % в умовах вогневої установки з фіксованою температурою печі (T_2) [3]. Відповідно, наші розрахунки для нагрівальної печі, проведені через ентальпійні залежності, дають дуже близькі значення δB_f (рис. 2). Інші автори вказують на подібні скорочення витрат NG та електроенергії при аналізі роботи печі стану гарячої прокатки. Так, в роботі [4] названі значення δB_f = 19,6–26,8 %, для повної енергії (NG + електрика) 15,1–20,7 % [4]. В останньому випадку економія енергії супроводжувалась скороченням викидів парникових газів на 11,1–15,2 % для двох оптимальних випадків зі зменшенням на 14–27 % викидів, що регламентуються: nitrogen oxides, (NO_x), carbon monoxide (CO), particulate matters (PM), volatile organic carbons (VOC).

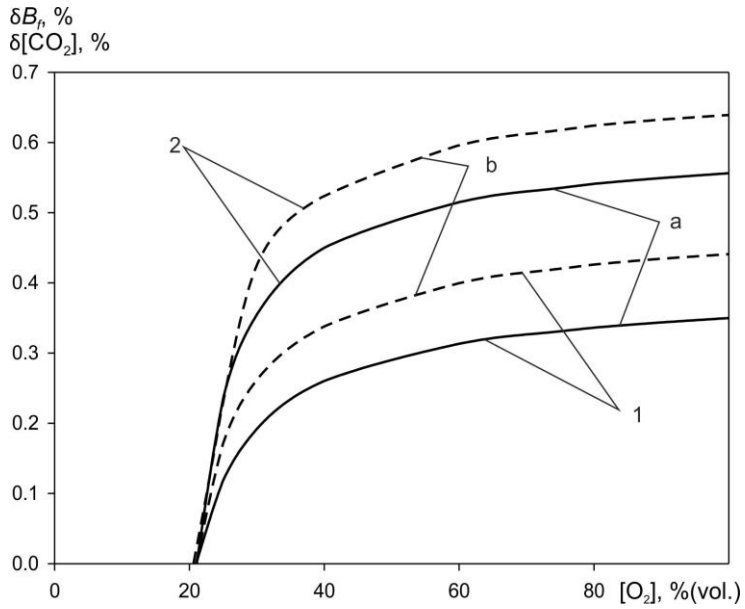


Рис. 2. Залежність економії палива δB_f та скорочення викидів $\delta[CO_2]$ від збагачення повітря-окислювача киснем $[O_2]$,% (vol.).
Паливо – CH_4, окислювач – повітря, збагачене O_2. T_{fur}, K: 1– 1473; 2– 1823.
Піч: 1– нагрівальна, прокатне виробництво; 2 – плавильна, скловарна;
Розрахунки, криві: a – через $T_{CP}(T_1, T_2)$ – суцільна крива; b – через $Q(Q_1, Q_2)$ – пунктирна крива

Висновки. З використанням теорії заміщення палив (Сорока Б. С.), а також температурного та ентальпійного представлень за ККД циклу Карно запропоновано та розраховано вплив на втрати палива енергетичного потенціалу паливо-окислювальної суміші. Доведено теоретично та підтверджено експериментально доцільність слабкого збагачення повітря горіння киснем. Так, збагачення повітря горіння киснем зі звичайних 21 % O_2 до 30 % забезпечує економію понад 20 % палива, створюючи при цьому компроміс між енергетичними та екологічними (щодо утворення NO_x та CO) складовими використання палива [5].

ПОСИЛАННЯ

1. Wunning, J. G. Future heating of industrial furnaces. Heat Processing. 2021. #01. P. 23–25; 2021 #04. P. 27–29.
2. Bendersky B. Ya. Engineering thermodynamics and heat transfer. /3/+ Third edition. SRC “Regular and chaotic dynamics” Centre (R&C). 2007. 264 p.
3. Wu, K.-K., Chang, Y.-C., Chen, C.-H., & Chen, Y.-D. (2010). *High-efficiency combustion of natural gas with 21–30% oxygen-enriched air. Fuel, 89(9), 2455–2462.* doi: 10.1016/j.fuel.2010.02.002
4. Khalid, Y., Wu, M., Silaen, A., Martinez, F., Okosun, T., Worl, B., et al. (2021). *Oxygen enrichment combustion to reduce fossil energy consumption and emissions in hot rolling steel production. Journal of Cleaner Production, 320, 128714.* doi: 10.1016/j.jclepro.2021.128714
6. Ming, X., Borgnakke, D.S., Campos, M.A., Olszewski, P., Atreya, A., & Borgnakke, C. (2013). *Possibility of Combustion Furnace Operation with Oxygen-Enriched Gas from Nitrogen Generator*.

УДК 621.316.9

ENHANCING THE DRYING OF SEAWATER-DERIVED MAGNESIUM HYDROXIDE SLURRY USING NON-UNIFORM ELECTRIC FIELDS

A. Harford

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (+38-098-272-1770), e-mail: mojaverocketman@gmail.com

*This paper presents a system for **enhancing the drying of magnesium hydroxide ($Mg(OH)_2$) slurry derived from seawater-based brines** using a non-uniform DC electric field. Experiments were conducted at temperatures from 20.1 °C to 80 °C using a laboratory hotplate, **DC ionizer**, digital scale, and infrared camera to analyze surface temperature changes. A significant improvement in drying rate was observed with increasing temperature, with a decline in effectiveness above 50 °C.*

Key words: *electrostatic, drying, non-uniform, dielectrophoresis, infrared, evaporation, electrohydrodynamic (EHD), electric field.*

ПІДВИЩЕННЯ ВИСУШУВАННЯ СУСПЕНЗІЇ ГІДРОКСИДУ МАГНІЮ, ОТРИМАНОЇ З МОРСЬКОЇ ВОДИ, ЗА ДОПОМОГОЮ НЕРІВНОМІРНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПОЛІВ

А. Г. Харфорд

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (+38-098-272-1770), e-mail: mojaverocketman@gmail.com

*У цій роботі представлено систему для **підвищення висушування суспензії гідроксиду магнію ($Mg(OH)_2$), отриманої з морських сольових розчинів**, за допомогою нерівномірного постійного електричного поля. Експерименти проводилися при різних температурах (від 20.1 °C до 80 °C) із використанням лабораторної гарячої плити, **DC-іонізатора**, цифрових вагів та інфрачервоної камери для аналізу змін температури поверхні. Було зафіксовано значне покращення швидкості висушування зі зростанням температури, із поступовим зниженням ефективності вище 50 °C.*

Ключові слова: *електростатика, висушування, нерівномірний, діелектрофорез, інфрачервоний, випаровування, електрогідродинаміка (EHD).*

ORCID: 0000-0002-9898-6474;

The drying of agricultural and industrial products consumes an enormous amount of energy worldwide, and is often done utilizing heat convection. The purpose of this work was to observe evaporation rates of H2O from a magnesium hydroxide $Mg(OH)_2$ slurry with 77% water by mass, sourced from sea-salt farm based bitterns provided by ResourSEAS in Palermo, Sicily. An electrohydrodynamic (EHD) point-to-plate system was used, along with a laboratory hotplate. A control without the EHD system ran simultaneously, on the same hotplate and differences in evaporation rates were compared measuring mass on a digital scale. The EHD system utilized a 5,250 volt, 0.3 milliampere Amcor Ionizer, a tungsten needle set 1 cm above the paste, and aluminum sheet approximately 1 cm directly below the paste and fitted into a plexiglass petri dish to determine if EHD systems can be a viable way to dry heterogenous material which has high water content and is not receptive to traditional drying methods. A Infiray P2Pro™ Infrared Camera was utilized to monitor evaporation behavior in the form of temperature changes and differences in the experimental and control systems over time, and has been analyzed in another work. While drying, the experimental sample had temperatures that were consistently 6 to 10 degrees Celsius cooler than controls, until the sample was dry, and temperatures then increased to above the controls for the duration of the experiment, since controls continued to evaporate. Changes in mass from start to finish were measured using a digital scale with a sensitivity of one milligram.

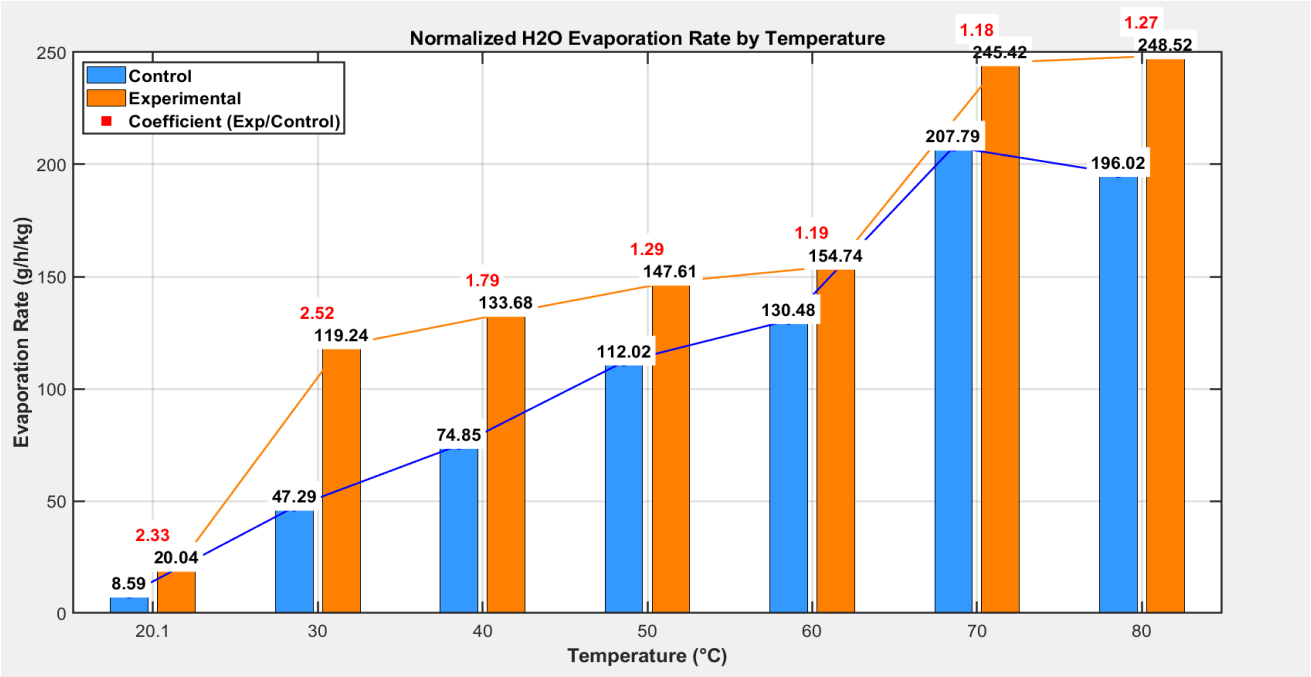


Figure. Evaporation graph of $Mg(OH)_2$ of control and experimental systems across temperature range

Rates of evaporation were found to be greater in experimental samples, with highest coefficient increases of experimental over control rates at 20.1 (ambient), 30C, and 40C. Drying coefficients of $Mg(OH)_2$ slurry as seen in the graph were as follows: 2.33x (20.1C), 2.52x (30C), 1.79x (40C), 1.29x (50C), 1.19x (60C), 1.18x (70C), 1.27x (80C) in terms of grams per hour, per kilogram of material (g/h/kg). While increases in evaporation were found across all temperature conditions, from 50-80C the EHD effect was reduced and this can be attributed to kinetic heat energy becoming the dominant force, while EHD effectiveness was more pronounced at lower temperatures. This is in line with theory and observations of elementary thermodynamics. Mechanisms of action are proposed to be the ionic wind, dielectrophoresis, electroosmosis, reduction in Gibbs Free Energy, and loosened hydrogen bonding.

This approach provides a different mechanism to dry seawater-based magnesium hydroxide samples, and demonstrates that non-uniform electric fields can enhance drying in heat-sensitive materials where traditional methods may be impractical or undesirable. The use of consumer-grade infrared imaging cameras with software also offers a cost-effective alternative for analyzing behavior in EHD evaporation and drying systems. In closing, EHD drying for temperature-sensitive materials is a phenomenon that warrants further, more formal investigation and development.

REFERENCES

1. Barthakur, N. N. (1989). AN ELECTROSTATIC METHOD OF DRYING SALINE WATER. *Drying Technology*, *7*(3), 503–521. https://doi.org/10.1080/07373938908916606
2. Kirschvink-Kobayashi, Atsuko, and Joseph L. Kirschvink. "Electrostatic enhancement of industrial drying processes." *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development* 25.4 (1986): 1027-1030.
3. Reznikov, Michael A., Alex Kolessov, and Richard Koziol. "Electrohydrodynamic enforcement of evaporation and gas flow." *IEEE Transactions on industry applications* 47.2 (2011): 1036-1042.
4. Kudra, T., & Martynenko, A. (2023). Electrohydrodynamic drying: The opportunity for sustainable development. Drying Technology, 41(16), 2606–2619. https://doi.org/10.1080/07373937.2023.2207634
5. IRCAM Data Analysis Software. URL:https://www.ircam.de/ (дата звернення: 12.02.2025)
6. Infiray P2Pro Imager from manufacturer URL:https://www.infiray.com/p2-pro-thermal-camera-for-smartphone/ (дата звернення: 20.02.2025
7. Magnesium Hydroxide Paste and Brine Samples graciously sent from ResourSEAS. URL: https://resourseas.com/ (дата звернення: 20.02.2025)

УДК 536.2

АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ПОВІТРОПРОНИКНОСТІ ОБОЛОНКИ БУДІВЛІ

О. Л. Декуша[1], С. І. Ковтун[2], В. В. Цапенко[3], А .О. Рябіков[4]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (099) 45-25-531, e-mail: capenko.valik@ukr.net

Представлено апаратно-програмну реалізацію системи контролю повітропроникності оболонки будівлі, яка відповідає вимогам міжнародного стандарту ДСТУ EN ISO 9972:2022. Розроблена система дозволяє здійснювати високоточний контроль параметрів повітропроникності та мікроклімату приміщень з метою забезпечення енергоефективності та комфортних умов перебування людини. Система побудована за модульним принципом, що забезпечує гнучкість, надійність, сумісність та можливість розширення функціоналу. Програмне забезпечення системи складається з трирівневої структури, яка забезпечує збір, опрацювання, архівування та аналіз даних, а також можливість експорту результатів. Запропонований підхід забезпечує точність, економічність і надійність вимірювань, що є важливим для практичного використання в сфері енергоаудиту та моніторингу стану будівель.

Ключові слова: *повітропроникність будівлі, герметичність, мікроклімат приміщень, інформаційно-вимірювальна система, апаратно-програмний комплекс, енергоаудит, контроль параметрів.*

HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A BUILDING ENVELOPE AIRTIGHTNESS CONTROL SYSTEM

O. Dekusha[1], S. Kovtun[2], V. Tsapenko[3], A. Riabikov[4]

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (099) 45-25-531, e-mail: capenko.valik@ukr.net

A hardware and software implementation of a building envelope air permeability control system is presented, which meets the requirements of the international standard DSTU EN ISO 9972:2022. The developed system allows for high-precision control of air permeability and microclimate parameters in rooms in order to ensure energy efficiency and comfortable living conditions for humans. The system is built on a modular principle, which provides flexibility, reliability, compatibility and the ability to expand functionality. The system software consists of a three-level structure that provides data collection, processing, archiving and analysis, as well as the ability to export results. The proposed approach ensures accuracy, cost-effectiveness and reliability of measurements, which is important for practical use in the field of energy auditing and building condition monitoring.

Key words: *building air permeability, tightness, indoor microclimate, information and measuring system, hardware and software complex, energy audit, parameter control.*

ORCID: [1]https://orcid.org/0000-0003-3836-0485; [2]https://orcid.org/0000-0002-6596-3460; [3]https://orcid.org/0000-0003-1095-0117; [4]https://orcid.org/0009-0003-6440-6202

Повітропроникність оболонки будівлі є важливим показником, що безпосередньо впливає на енергоефективність та мікроклімат приміщень. Надмірна герметичність, досягнута шляхом використання щільних теплоізоляційних матеріалів, може погіршувати якість повітря за відсутності природної вентиляції. Водночас зниження повітропроникності суттєво знижує втрати тепла, підвищуючи енергоефективність [1, 2].

Контроль повітропроникності здійснюється відповідно до стандарту ДСТУ EN ISO 9972:2022 «Теплотехнічні характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод випробувального тиску (EN ISO 9972:2015, IDT; ISO 9972:2015, IDT)»[3].

Для забезпечення дослідження повітропроникності оболонки будівель систему контролю реалізовано відповідно до вимог для інформаційно-вимірювальних систем, яка є сукупністю функціонально об'єднаних вимірювальних,

обчислювальних технічних засобів [4]. Характерною особливістю інформаційно-вимірювальних систем є модульний принцип побудови, який передбачає створення конструктивно завершених модулів і використання стандартних приладів. Цей принцип забезпечує технічну та інформаційно-функціональну сумісність модулів, спрощує технічне обслуговування, дозволяє розширити функціональні можливості, а також підвищує точність і надійність системи.

Серед основних вимог, що висуваються до системи, є такі:

- теоретична обґрунтованість, відповідність вимогам стандартів, що регламентують проведення дослідження;
- функціональність: можливість проведення контролю повітропроникності оболонки будівлі різних типів, розмірів та за різних умов;
- надійність;
- економічність: мінімізація фінансових та ресурсних витрат при проведенні вимірювань.

Апаратна частина системи контролю повітропроникності оболонки будівлі являє собою сукупність функціонально об'єднаних модулів, сенсорів, допоміжного обладнання і персональний комп'ютер з відповідним програмним забезпеченням.

Програмний пакет реєстрації та опрацювання вимірювальної інформації системи контролю розділено на три взаємопов'язані рівні.

Перший рівень відповідає за безпосереднє перетворення аналогових сигналів на цифрові, забезпечує задання та підтримання режимів вимірювання, керує форматуванням отриманих даних та забезпечує передачу цих даних через інтерфейс.

На другому рівні відбувається попереднє опрацювання даних: прийнята з інтерфейсу інформація конвертується та зберігається для подальшого використання.

Спеціалізований третій рівень програмного забезпечення пристосований до виконання конкретних завдань системи, пов'язаних з аналізом теплових процесів. Через третій рівень здійснюється загальне управління системою, а також опрацювання даних, зібраних на нижчих рівнях.

Апаратно-програмний комплекс контролю повітропроникності будівель або їх частин забезпечує виконання вимог міжнародного стандарту ДСТУ EN ISO 9972:2022 «Теплотехнічні характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод випробувального тиску». Підсистема створення різниці тиску забезпечує об’ємну витрату повітря в діапазоні від 1800 … 4000 м^3/год, що дає можливість проводити випробування на об’єктах площею від 18 до 100 м^2; діапазон вимірювання різниці тиску − (0…200) Па з невизначеністю ±0,3 Па, діапазон вимірювання об’ємної витрати повітря − 50 ...4000 м^3/год. За рахунок використання модульного принципу при створенні апаратно-програмного комплексу можливо проводити калібрування системи за кожним окремим показником та інтеграцію з іншими системами, які використовуються при проведенні енергоаудиту.

Розроблений прототип створено в межах проєкту «Інформаційна технологія енергоаудиту будівель як складова енергетичної безпеки країни» за підтримки Національного фонду досліджень України в межах конкурсу «Наука для відбудови України у воєнний та повоєнний періоди».

ПОСИЛАННЯ

1. Karpenko D., Yevtukhova T., Novoseltsev O. Method for assessing the efficiency of the district heating system under market conditions. Vidnovluvana Energetika. 2024. 79(4). Pp. 6−16, DOI: 10.36296/1819-8058.2024.4(79).6-16

2. Babak V., Dekusha O., Kovtun S., Burova Z., Parkhomenko G. Computational Fluid Dynamics Model of the Heat Transfer at Thermal Resistance control of Building envelope CEUR Workshop Proceedings, 3513, pp. 363−373, 2023 URL: https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper30.pdf

3. Теплотехнічні характеристики будівель. Визначення повітропроникності будівель. Метод випробувального тиску: ДСТУ EN ISO 9972:2022 (EN ISO 9972:2015, IDT; ISO 9972:2015, IDT). Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 38 с. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=98664 (дата звернення: 14.03.2025).

4. Babak, V., Babak, S., Zaporozhets, A. Tasks for Creating the Environmental Monitoring Systems for Energy Objects. In: Statistical Diagnostics of Electric Power Equipment. 2025. Studies in Systems, Decision and Control, vol 573. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76253-6_9

УДК 691.41: 536.21: 621

ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR PASSIVE HOUSES USING CLAY-CONCRETE STRAW BLOCKS ACCORDING TO THE THERMAL CONDUCTIVITY CRITERION

L. Kyrnos[1], Henry Zaks[2]

[1]Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine,

50 Metrolohychna St., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (067) 649-06-68, e-mail: larakirnos@gmail.com[1]
Los Altos High School, CA, USA[2]

The article discusses the method of accelerated restoration of low-rise residential buildings destroyed in the conditions of hostilities in the territories of Ukraine, from available building materials and using passive solar technologies for heat supply to houses.
An analytical study is carried out of the use of clay concrete with organic filler (straw) for the construction of low-rise solar passive houses in the territories of Ukraine, in the presence of organic raw materials (straw) and sufficient raw material reserves of clay soils with a clay fraction content of 15%. The basic requirements that building materials and products must meet are determined. The thickness of energy-efficient external walls made of clay-concrete straw blocks is calculated according to the criterion of thermal conductivity. A sufficient number of sunny days per year is important for the use of solar radiation in solar passive heating systems in houses made of clay-concrete straw blocks, and the high heat capacity of these structures allows them to be used as a heat-accumulating component in the solar heating system.

Keywords: *clay-concrete straw blocks, energy-efficient structures, thermal conductivity criterion of building structures, solar passive heating system.*

ORCID: [1]0000-0003-2503-3071; [2]0009-0001-4532-1671.

Clay-concrete with organic filler (straw) is an environmentally friendly organic building material, it is made from local and relatively inexpensive raw materials: soils with a high content of clay matter, organic agricultural waste (wheat straw). The climate of the southern regions of Ukraine - hot, dry, with a large number of sunny days, limited precipitation - is best suited for carrying out technological cycles for the manufacture and drying of clay-concrete straw blocks with obtaining a standard moisture content of 8%, carrying out the construction of a low-rise individual house in the same season. The thermophysical properties of wall structures made of clay-concrete straw blocks allow them to be used as heat accumulators in solar passive house heating systems, taking into account the intensity of solar radiation and a fairly large number of sunny days [10].

Key Findings

Clay-concrete straw block is a small-piece product made of clay soil and organic filler, such as straw, which cannot be burned. It is manufactured both individually and in industrial production conditions. Clay soils, which are raw materials for producing adobe blocks as a building material, have their disadvantages and advantages.

Disadvantages.

1. **Heterogeneity of clay soils.** Depending on the location of the quarry, the properties of clay soils differ in terms of mineral and organic composition, the percentage of elements such as clay, sand, dust, and rocky particles. Clays consist of one or two minerals of the group of kaolinite, montmorillonite or other layered aluminosilicates (clay minerals), but can contain sand and carbonate particles. The content of the main chemical components in most clays varies within the following ranges: SiO_2 – 45-70%, Al_2O_3 – 20-38%, TiO_2 – 0.4-1%, CaO – 0.1-3%, MgO – 0.1-5% and 5-15% water [1].

2. **Soils with a high content of clay matter** have significant shrinkage [2,3]. When dry, clay soils shrink significantly, decreasing in volume, which leads to shrinkage deformations such as cracks and changes in geometric parameters of the block. Air linear shrinkage is generally 3% to 12% in moving mixtures, and 0.4% to 2% in rigid mixtures. Shrinkage can be reduced by optimizing the particle size distribution of the mixture using stabilization additives.

3. **Clay soils are not waterproof,** so walls made of clay concrete adobe blocks must be protected from precipitation, from groundwater ingress from the foundations and from capillary osmosis through the wall surface [4]. Structural solutions should provide for the removal of precipitation from the roof surface without leaks onto the wall. The basement of the

foundation should be raised 55-60 cm above ground level, and the cement blind area should be arranged in accordance with the standards. The organization of the construction process should ensure the completion of construction before the onset of the season of autumn rains and low temperatures.

Advantages.

1. **Clay concrete wall materials** balance the humidity of the air in the room, thereby creating favourable conditions for the microclimate in the room. In one of the clay concrete houses in Germany, microclimate conditions were studied [9], so it turned out that the relative humidity did not change during the year, staying at the level of 50%.

2. **Environmental friendliness.** Clay-concrete wall materials reduce environmental pollution, since much less energy resources are spent on their manufacture, transportation, and construction than on other building materials. Also, these materials can be reused as raw materials for construction [5].

3**. Physical and thermal properties.** Clay, as one of the varieties of aluminosilicates, is able to withstand the maximum resistance at compression from 30 to 150 kg/cm2 when dried, which is sufficient for the use of clay material in the production of wall unheated materials and as mixtures for masonry and for plastering wall surfaces [1]. But the strength of non-burning building materials is significantly reduced after moistening, and in direct contact with water, it softens and is easily destroyed. Wall structures made of clay concrete materials have a high capacity for thermal inertia, so they can be used in passive solar heating systems as thermal energy accumulators [5].

4. **Protection against harmful biological factors**. Clay concrete protects organic fillers in its composition (wood, straw, shavings, sawdust). Since clay-concrete has high capillarity and low weighted moisture content (from 0.4% to 6%), it is able to store the organic materials it encounters. Therefore, neither fungi nor insects can damage the wood, because for the development of insects, the humidity is 14-18%, for fungi - more than 20%. The clay-concrete material protects the straw contained in the adobe clay block from fungi [7]. But, if the clay concrete adobe block has a density of less than 500-600 kg/m3, then this material is not able to protect the straw from excessive moisture due to high capillarity.

5. **Economy.** The use of clay concrete wall materials reduces construction costs because, firstly, clay raw materials do not need to be brought from afar; it is a local material, and secondly, significant energy costs are not required for the processing of raw materials and the manufacture of adobe blocks [6]. Using clay concrete wall materials allows you to build a low-rise residential building with a minimum number of workers under the conditions of construction management by a qualified specialist and a minimum amount of construction equipment.

There are three directions in the technology of construction of individual adobe houses, taking into account three types of adobe structures: wooden frame structures with monolithic filling of walls with clay concrete (roller walls), wooden frame structures with filling walls with clay concrete adobe blocks, reinforced structures of load-bearing walls and partitions made of clay-concrete straw blocks.

At present, the spread of industrial multi-storey construction and the use of technologies for the construction of clay-straw houses are very limited for a number of reasons: lack of regulatory documents, development of combined use of adobe structures, and low awareness of technologies that are available for individual construction [8].

For a wider and more efficient use of clay-concrete straw blocks in low-rise individual construction, it is necessary to improve the regulatory framework for their manufacture, design of modern energy-efficient structures from adobe blocks, construction and operation. To do this, it is necessary to consider the requirements of the Technical Regulations applicable to low-rise construction. Since there are no standards and technical regulations for the construction of low-rise clay-concrete buildings and clay-concrete straw blocks, it is advisable to use the regulatory framework for the design and arrangement of building structures using autoclaved cellular concrete products [12-13]. To confirm the conclusion about the effectiveness of the combined use of clay-concrete adobe blocks and cellular concrete products of autoclave hardening in the structures of low-rise solar passive buildings, it is necessary to investigate the compliance of these structures with the requirements of European standards and technical regulations.

The main requirements for the qualities of clay-concrete straw blocks (hereinafter referred to as the CSB) in accordance with the Technical Regulations in the field of building materials and products are:

1 **Composition of clay mix**, percentage of minerals included in clay raw materials, as well as compensatory measures for the expected properties of GSB (DSTU B V.2.7-60-97);

2. **GSB density**. It is determined by the experimental method (DSTU V.2.7–36–95, DSTU B V.2.7-42-97). The density of GSB will be different depending on the amount of organic filler, the chemical composition of clay raw materials, and the moisture content of the manufactured raw block.
3. **Compressive, bending, tensile strength**. Modulus of elasticity. These parameters depend on the density of the GSB, geometric dimensions, moisture, etc. They are determined by the results of tests in the laboratory according to DBN V.1.2 -14:2009, DBN V.1.2 -2:2006, DBN V. 2.6-162:2010.

4. **Fire resistance of walls made of GSB**. It is determined based on the results of laboratory tests in accordance with the test methods DBN V.1.1.7-2016.

5. **Shrinkage when drying**. Linear (temperature) deformations are determined during the drying of raw materials. Based on the results of tests in the laboratory, the technological conditions of drying the raw material, the presence of final moisture, and deformation tolerances are determined (DSTU B V.2.7-42-97, DSTU B V.2.7–36–95).

6. F**rost resistance.** They are determined by the results of tests in the laboratory in accordance with the test methods DBN V.1.2 -14:2009, DSTU B V.2.7-42-97.

7. **Water permeability** (equilibrium humidity). It is determined based on the results of tests in the laboratory in accordance with the test methods DBN V. 2.6-31:2016, DSTU B V.2.7-42-97. The dew point is determined in solid and multilayer structures.

8. **Thermal conductivity. Vapor permeability. Heat capacity.** They are determined by the results of tests in the laboratory in accordance with the test methods DBN V. 2.6-31:2016, DSTU B V. 2.6-35:2008. Calculations are made for compliance with the normative values.

9. **Soundproof.** It is determined by soundproof characteristics according to DBN V. 1.2-10-2008.

10. **Radioactivity** of clay raw materials and GSB products according to DBN V.1.4-2.04-97.

11. **Protection of the GSB from biological damage**. Indicate mechanical and chemical measures that provide protection against pests: insects (wasps, ants, ticks, etc.); rodents (mice, rats, etc.); and fungal mould.

Determination of the thickness of the structure of an external energy-efficient wall made of clay-concrete adobe blocks according to thermal engineering indicators.

The requirements for thermal protection of houses are satisfied in accordance with DBN V. 2.6-31:2016, if the standard indicator for thermal protection is observed in the houses, which is 3.3 (m^2·K)/W for the first construction zone of the territory of Ukraine, for the II construction zone - 2.8 (m^2·K)/W. External energy-efficient wall structures can be either homogeneous single-layer or multi-layer. The thermal resistance of a homogeneous single-layer wall is determined by the formula [11]:

$$R_{oc} = \frac{\delta_{oc}}{\lambda_{oc}}, \quad (1)$$

where $\boldsymbol{\delta_{os}}$ is the thickness of the wall, m; $\boldsymbol{\lambda_{os}}$ is the calculated coefficient of thermal conductivity of masonry, W /m^2·K. The coefficient $\boldsymbol{\lambda_{os}}$ of masonry depends on the density of clay-concrete straw blocks, the calculated equilibrium moisture content of the wall, and the type of masonry mortar [11].

The geometric dimensions of clay-concrete straw blocks are adopted by analogy with foam blocks or cellular concrete; the density in the dried state is assumed to be 800-900 kg/m^3 [12,13].

Table 1. Heat transfer resistance of single-layer masonry made of clay concrete adobe blocks *R, (m2·K)/W*

Block name	Geometric dimensions, mm	Density, ρ kg/m^3	Thermal conductivity coefficient λ, W /m^2·K	Heat transfer resistance, R, (m^2·K)/W
Clay-concrete straw block	200x250x625	900	0.3	0.66
Clay-concrete straw block	250x250x625	900	0.3	0.83
Clay-concrete straw block	300x250x625	900	0.3	1.0
Clay-concrete straw block	375x250x625	900	0.3	1.25
Clay-concrete straw block	400x250x625	900	0.3	1.4

The table shows that with a masonry thickness of 200-400 mm, it is impossible to meet the requirement of the standard heat transfer resistance indicator of 3.3 (m2·K)/W. Therefore, a single-layer wall is inefficient in terms of the heat-shielding functions of the external thermal insulation shell and requires optimized solutions for clay-concrete adobe walls. Therefore, an energy-efficient multilayer wall is proposed, which would have a normalized resistance to heat transfer, protect clay-concrete from moisture and other atmospheric influences. A multilayer wall in such a composition from the middle of the room to the outside: the load-bearing part is reinforced masonry on an adhesive mixture of clay-concrete straw blocks; vapor barrier film; a layer of effective thermal insulation with a thickness of 100-120 mm; ventilated air gap 40 mm thick; siding decoration of the front surface of the wall. The heat transfer resistance of an external multilayer wall is determined by the formula [11]:

$$R_{бс} = \frac{1}{\alpha_{вн}} + \frac{\delta_{ос}}{\lambda_{ос}} r + \sum_{i=1}^{3} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{зв}}, \quad (2)$$

where

$\alpha_{вн}$, $\alpha_{зв}$ — heat transfer coefficients of the inner and outer surfaces of the envelope, W /m^2·K, are accepted according to DBN V. 2.6-31:2016;

$\delta_{ос}$ — thickness of masonry made of clay-concrete straw blocks, m;

$\lambda_{ос}$ — calculated coefficient of thermal conductivity of masonry, W /m^2·K;

r — the coefficient of thermal homogeneity of masonry, which determines the thermal heterogeneity of masonry due to the presence of mortar joints. Accepted: 1) for masonry on glue with an adhesive layer thickness of up to 3 mm, r = 0.99; 2) for masonry on mortar with a layer thickness of 10-15 mm, according to Table 1.5 [14];

δ_i — thickness i – of the layer of the outer wall (heat-insulating, finishing);

λ_{ip} — the calculated coefficient of thermal conductivity i – of the layer of the outer wall, W /m^2·K .

Table 2. Heat transfer resistance of effective multilayer reinforced masonry made of clay-concrete straw blocks with a density of 900 kg/m^3

Name of the masonry layer	Layer thickness, mm	Thermal conductivity coefficient W /m2·K	Heat transfer resistance, R, (m2·K)/W	Coefficient of vapor permeability, μ , mg/(m h Pa)
Masonry of light adobe clay-concrete block, with a density of 900 kg/m3	200	0.3	0.64	0.26
	400	0.3	1.3	0.28
Mineral wool boards on synthetic binder (4-5%)	120	0.045	2.6	0.56
	100	0.045	2.2	0.53
Ventilated air gap 0°C	40	1.29	0.022	
Siding panels, exterior decoration	12	--	--	--

Therefore, the heat transfer resistance of an energy-efficient wall (according to formula 2) made of light clay-concrete adobe block, with a density of 900 kg/m3, a masonry width of 200 mm is ***R_{200} = 3.428 (m^2·K)/W'***, with a width of 400 mm is ***R_{400} = 3.658 (m^2·K)/W'***, which satisfies the requirements for the standardized energy efficiency of the structure.

Conclusions

1. This paper conducts an analytical study into the self-construction of low-rise buildings from natural raw materials - clay, straw, sand, as well as the feasibility of using it on the territory of Ukraine, where there is a sufficient number of deposits of clay and straw as agricultural waste. The disadvantages and advantages of structures made of clay-concrete straw have been identified. The main requirements that the indicators of technical compliance with building materials and products must meet are defined. Elimination of shortcomings and optimization of useful properties of clay-concrete straw, a combination of traditional adobe construction technologies and modern high-tech materials contributes to reaching a new level of environmental friendliness, creating more advanced systems based on passive generation of solar energy in low-rise adobe buildings.

2. Optimization of external wall structures made of clay-concrete straw blocks is achieved due to the installation of hinged façade systems with a ventilated air gap and a heat-insulating layer, the characteristics of which are determined by the thermal conductivity criterion. The established heat transfer resistance indicators improve the energy efficiency of both external wall structures and a low-rise heliopassive building as a whole:

- increased frost resistance due to an increase in the number of freezing and thawing cycles, thereby extending the life of the normal operation of the house (durability);

- ventilated air gap makes it possible to remove excess moisture from clay-concrete adobe masonry and heat-insulating layer, which got into these structural elements during the period of frequent precipitation and low external temperatures;
- the formation of water condensate, that is, the "dew point" moves from the thickness of the clay-concrete straw masonry to the heat-insulating layer, then excess moisture is removed during the period of high summer temperatures;
- the weather-resistant layer of the external wall decoration (moisture-resistant panels, or face brickwork, or hydrophobic plaster) prevents direct ingress of moisture on the clay-concrete straw masonry, thereby providing requirements for the strength and stability of wall load-bearing structures.

REFERENCES

1. Potapenko S.V. Clays and clay rocks of the Ukrainian SSR: Iz-vo Acad. S&A of the Ukrainian SSR // Kyiv: Publishing House of the Academy of Architecture of the Ukrainian SSR, 1952. – 268 p. [Rus].
2. Minke, G.: Earthquake resistant low-cost houses utilising indigenous building materials and intermediate technology, in: Proceedings, International Symposium on Earthquake Relief in Less Industrialized Areas. Ziirich, 28.-30. March 1984 (a) [Germ].
3. Minke, G.: Lehmbauforschung. Schriftenreihe Fachbereich Architektur. Gesamthoch-schule Kassel, Heft 8. Kassel 1984 (b) . [Germ].
4. Minke, G.: ZeitgemaBe LehmfuBboden fur den Selbstbau, in Minke, G. (ed.): Bauen mit Lehm No. 2, grebenstein 1985. [Germ].
5. Minke, G.: Design and Construction of Energy and Cost Saving Vault and Dome Structures, in: Proceedings of the International Symposium [Germ].
6. Minke, G.; Mukerji, K.: Structurally Optimized Domes - A. Manual of Design and Construction. Braunschweig 1995. [Germ].
7. Mohler, K.: Crundlagen der Holzhochbaukonstruktionen, in: Gotz, K.-HJ.; Hoor, D. et al.: Holzbauatlas. München 1978. [Germ].
8. Minke G., Clay-concrete and its application / G. Minke. - K: FSUIPP "Amber Tale", 2004. - 232 p. [Rus].
9. Boemans, U.: Sanierung und Umnutzung einer Fachwerkscheune (Kassel FB 12) 1990. [Germ].
10. Duffie J. A. Solar engineering of thermal processes / J. A. Duffie, W. A. Beckman. – 4th Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2013. – 928 p. [Eng].
11. State Building Rules 2.6-31:2016 Thermal insulation of buildings // State Research Institute of Building Structures / State-owned enterprise Ukrarchbudinform. Kyiv. 2012. 30 p. [Ukr].
11. State Building Rules 2.6-31:2016 Thermal insulation of buildings // State Research Institute of Building Structures / State-owned enterprise Ukrarchbudinform. Kyiv. 2012. 30 p. [Ukr].
12. DSTU-N B V.2.6-202:2015 Guidelines for the design and arrangement of building structures using cellular concrete products of autoclave hardening. [Ukr].
13. DSTU B V. 2.6-195:2013 Wall structures made of blocks made of low-density concrete of autoclave hardening. General technical conditions. [Ukr].
14. DSTU B V.2.6-101:2010 Constructions of buildings and structures. Methods for determining the heat transfer resistance of enclosing structures. [Ukr].

УДК 620.9

ВИВЧЕННЯ ТЕНДЕНЦІЙ ЗМІНИ СПОЖИВАННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕКОНОМІЦІ КРАЇНИ ЗАГАЛОМ І ЗОКРЕМА В ЕНЕРГОЄМНИХ СЕКЦІЯХ ЕКОНОМІКИ

В. В. Горський

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (095) 011-64-50, e-mail: Horskyi_VV@nas.gov.ua

Досліджено тенденції змін у споживанні теплової енергії в Україні за 2014–2021 роки. Проаналізовано динаміку в промисловості, комунальному секторі та сільському господарстві, а також зміни в структурі паливного балансу.

Ключові слова: *теплова енергія, енергоспоживання, промисловість, комунальний сектор, енергоефективність, паливний баланс, регіональний аналіз, альтернативні джерела енергії.*

STUDY OF TRENDS IN THERMAL ENERGY CONSUMPTION CHANGES IN THE NATIONAL ECONOMY AS A WHOLE AND IN ENERGY-INTENSIVE SECTORS OF THE ECONOMY

V. Horskyi

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (095) 011-64-50, e-mail: Horskyi_VV@nas.gov.ua

The trends in heat energy consumption in Ukraine from 2014 to 2021 were studied. The dynamics of energy consumption in industry, the municipal sector, and agriculture were analyzed, as well as changes in the fuel balance structure.

Key words: *heat energy, energy consumption, industry, municipal sector, energy efficiency, fuel balance, regional analysis, alternative energy sources.*

ORCID: 0000-0001-9128-9556

Україна як одна з найбільших енергоспоживаючих країн Східної Європи демонструє значні зміни в структурі та обсягах споживання теплової енергії протягом останніх років. Період з 2017 по 2021 рік характеризується коливанням споживання під впливом як економічних, так і кліматичних факторів. У цей період спостерігається поступовий перехід до більш енергоефективних технологій та зміна пріоритетів у генерації енергії.

За даними Державної служби статистики відповідно до енергетичного балансу України за 2014–2020 роки, було побудовано діаграму для визначення динаміки споживання теплової енергії в Україні, що представлена на рис. 1.

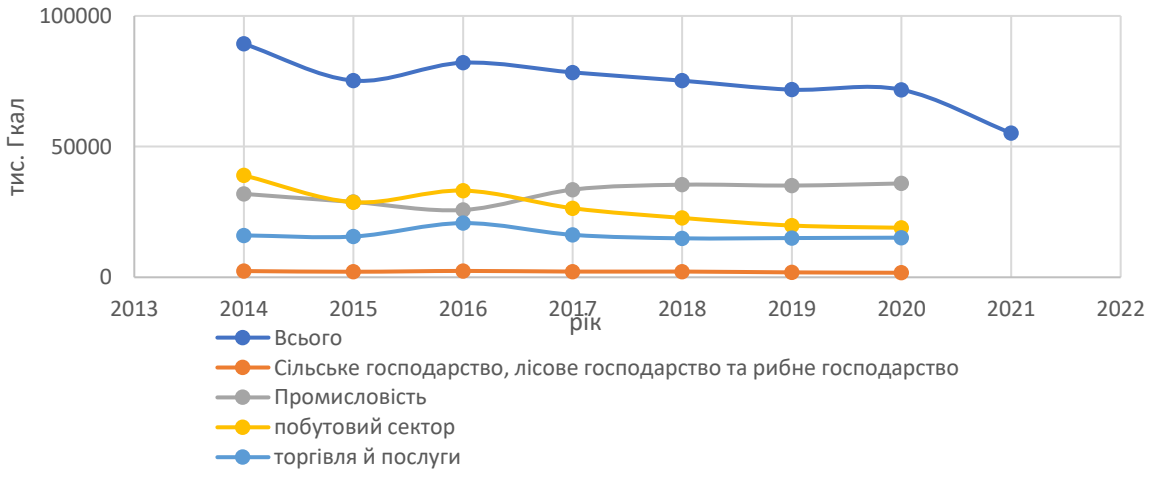


Рис. 1. Динаміка споживання теплової енергії у 2014–2020 рр. [1]

2017–2018 роки. Після спаду в 2017 році на 5,7 % порівняно з 2016 роком у 2018-му відбулося істотне зростання – на 4,8 %. Це може бути пов'язано з поступовим відновленням промислового виробництва та збільшенням використання ТЕЦ.

2019–2020 роки. Період характеризується спадом на 6,9 % у 2019 році та подальшим зниженням на 2,3 % у 2020-му, що пояснюється як економічною кризою, так і впровадженням енергоефективних технологій у промисловості.

2021 рік. Відновлення на 2,7 % може бути пов'язане з поступовим виходом економіки з кризи, збільшенням активності в промисловому секторі та потребою в опаленні після періоду пом'якшення обмежень, викликаних пандемією.

Промисловий сектор залишається найбільшим споживачем теплової енергії, використовуючи близько 40–50% загального обсягу. Найбільшими підсекторами є [1]:

- металургія – приблизно 25–26 % загального споживання промисловості;
- хімічна промисловість – близько 8–11 %;
- виробництво харчових продуктів – 12–13 %;
- виробництво коксу та нафтопродуктів – 5–6 %.

Зниження споживання в промисловості в 2019–2020 роках пов'язане зі спадом виробництва, проте у 2021 році спостерігається відновлення попиту на теплову енергію. Металургія, яка є енергоємною галуззю, поступово модернізує своє обладнання для зниження енергозатрат.

На комунальний сектор припадає 23–25 % загального споживання теплової енергії. Опалення житлових будинків та соціальних об'єктів (лікарні, школи) – приблизно 80 %. Підігрів води – 20 %. У 2020–2021 роках помітна тенденція до оптимізації теплових втрат через модернізацію тепломереж та підвищення енергоефективності будівель. Варто зауважити, що втрати теплової енергії в тепломережах становлять близько 10 млн Гкал щорічно, проте є тенденція до їх зниження [2].

Сільське господарство споживає відносно невелику частку – близько 2–3 % загального обсягу. Основні напрями споживання теплової енергії в цьому секторі – це опалення теплиць та використання в аграрних комплексах. Попри незначну частку, сільське господарство демонструє стабільне споживання теплової енергії завдяки зростанню попиту на тепличну продукцію [2].

Якщо розглядати в регіональному розрізі, то найбільшими споживачами теплової енергії в 2017–2021 роках були:

- Дніпропетровська область – 19–20 % загального обсягу;
- Запорізька область – 8–9 %;
- Київ та Київська область – 10 %.

Закономірно, що промислові регіони демонструють високий рівень споживання через концентрацію енергоємних підприємств. У Києві значну частку становлять комунальні потреби.

Також варто врахувати, що частка підприємств, які працюють на біопаливі, зросла з 27,1 % у 2017 році до 30,4 % у 2021-му, що свідчить про рух до екологічно чистої енергії [2].

Україна демонструє тенденцію до оптимізації споживання теплової енергії з акцентом на підвищення енергоефективності та перехід на альтернативні джерела. Промисловість залишається основним споживачем, тоді як комунальний сектор поступово скорочує споживання завдяки модернізації тепломереж. Попри такі виклики, як кліматичні умови та економічна криза, динаміка останніх років свідчить про позитивні зрушення в напрямі раціонального використання енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Статистичний збірник «Паливно-енергетичні ресурси України». https://ukrstat.gov.ua/druk/publicat/kat_u/publenerg_u.htm (дата звернення: 22, Березень 2025).
2. Державна служба статистики України Постачання та використання енергії. https://www.ukrstat.gov.ua/ (дата звернення: 11, Березень 2025).

УДК 621.3

КЕРУВАННЯ МУЛЬТИМІКРОМЕРЕЖАМИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ

В. І. Будько[1], Д. Є. Коротченко[2], О. В. Козачук[3], М. О. Будько[4]

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
м. Київ, Україна
тел.: (050) 249-25-91, e-mail: solar_budko@ukr.net

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, фотоелектрична установка, акумулятор енергії, мікромережа, динамічне навантаження*

MULTIMICROGRID CONTROLLING FOR ENERGY EFFICIENCY INCREASE

V. Budko[1], D. Korotchenko[2], O. Kozachuk[3], M. Budko[4]

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Kyiv, Ukraine
tel.: (050) 249-25-91, e-mail: solar_budko@ukr.net

Keywords: *renewable energy sources, photovoltaic installation, energy storage, microgrid, dynamic load*

ORCID: [1]0000-0002-6219-4221 [2]0009-0001-1318-6444 [3]0000-0003-1968-8178 [4]0000-0003-0928-1657

Актуальність дослідження. У контексті децентралізації енергопостачання постає необхідність розробки методів керування перетоками електричної енергії, які враховують наявні джерела генерації, системи акумулювання та споживачів електроенергії, для забезпечення ефективного використання отриманої енергії з найменшими втратами енергії на передачу й накопичення.

Мета дослідження. Метою роботи є дослідження можливостей оптимізації перетоків енергії та створення системи, яка могла б ураховувати багато складних факторів для прийняття рішення зі зменшення втрат енергії при використанні її в мікромережі. Основою методології є центральна обробка інформації про наявні вузли передачі енергії, установки генерації, системи накопичення, прогноз генерації та споживання й пошук найбільш оптимальних рівнів стану заряду та шляхів передачі енергії від генерувальних установок до локальних споживачів, що враховує топологію мікромережі та її особливості.

Основні матеріали досліджень. Останніми роками, внаслідок руйнувань та пошкодження об'єктів енергетики, суттєво змінились вузли розподілу електроенергії, а деякі ділянки зазнали великої модернізації, частково систематичної, частково хаотичної, коли обладнання встановлювалось бізнесом та приватними особами задля забезпечення власних потреб, без урахування особливостей загальної мережі, що призвело до суттєвих деформацій деяких ділянок електричної мережі, збільшуючи локальні осередки генерації та накопичення енергії, які зараз не задіяні в процесі підтримки стійкості мережі, проте мають великий потенціал в подальшому допомогти в стабілізації мережі та підвищити ефективність розподілу електричної енергії в межах цієї ділянки чи навіть мікромережі в цілому.

Останнім часом в Україну було імпортовано декілька ГВт інверторного обладнання, значно частина якого є обладнанням для фотоелектричних станцій, приватного та комерційного призначення, що може бути використане для підтримки енергосистеми. Встановлення сонячної фотоелектричної системи разом із системою зберігання (акумуляторами енергії) є ефективним рішенням, яке дозволяє користувачам зменшити свою залежність від мережі [1]. Зараз вони не є пов'язаними між собою і працюють виключно за логікою, що запрограмована в один індивідуальний інвертор, забезпечуючи локальну потребу одного споживача.

Відомо, що фотоелектричне обладнання певних виробників має можливість прогнозувати генерацію своєї фотоелектричної установки, порівнювати статистику споживання електроенергії цього об'єкта й адаптувати рівень стану заряду акумулятора, для того щоб ефективніше використати сонячну генерацію наступних періодів.

Перспективним напрямом є використання інформації про локальні фотоелектричні установки генерації та їх стан, перерахунок генерації наступного дня відносно доступної потужності установок у підсистемі, стан заряду усіх систем накопичення, які доступні в цей момент, прогнозу споживання комерційних споживачів на наступний день, приватних споживачів, виходячи з існуючої статистики їх споживацької поведінки, та забезпечення превентивного розряду деяких акумулювальних ємностей в теперішній період, з подальшим більшим акумулюванням більш дешевої та екологічної енергії від сонячних станцій в майбутніх періодах. За рахунок цього можна зменшити кількість використаного традиційного викопного палива для досягнення потрібної кількості електричної енергії, оскільки більшість цих установок накопичення простоюють, втрачаючи накопичену енергію, а також унеможливлюють подальший заряд цих ємностей від майбутньої генерації внаслідок повного заряду акумуляторних ємностей.

Для покращення виробництва та ефективного використання фотоелектричної енергії необхідно провести модернізацію підходів і технологічності зі сторони генерації та створювати сприятливі умови використання на стороні споживання та системи збереження енергії [2]. Регульоване керування навантаженням та накопичення енергії на стороні користувача матимуть позитивний вплив на ефективність споживання згенерованої енергії та стабільність роботи мережі.

Ідея полягає у використанні локальних лічильників електричної енергії, які будуть надавати інформацію про реальний та статистичний графік добового споживання, комунікаційний зв’язок центрального контролера та установок генерації й накопичення, для подальшої обробки всіх даних у режимі реального часу цим контролером та адаптації перетоків енергії в мікромережі, зменшуючи потребу в централізованих установках генерації на основі викопного палива, підвищуючи використання екологічно чистої енергії від станцій на основі відновлюваних джерел енергії, а також зменшуючи екологічний слід мережі та кількість викидів вуглекислого газу для досягнення щоденних потреб споживачів в Україні.

За рахунок використання такого контролера та мережі наступного покоління можна досягти самозабезпечення окремих ділянок мікромережі, або навіть цілих мереж районного значення, за рахунок власних генерувальних та акумулвальних установок. Технічні відмінності між мережами, до складу яких входять системи з сонячними інверторами і традиційними мережами, створюють нові виклики для операторів систем передачі [3]. Це вимагає розроблення нових алгоритмів та додаткових інвестицій для управління сучасними мережами.

Висновок. Мікромережі з локальним контролем генерувальних установок та систем накопичення енергії, з урахуванням інформації про майбутню генерацію та споживання, що частково є наслідком погодних умов, можуть досягти значно вищого рівня самозабезпечення без потреби споживати енергію з загальної об’єднаної мережі, тим самим зменшуючи вуглецевий слід цих ділянок мережі, а також підвищуючи їх стабільність, оскільки навіть у разі блекаутів ці ділянки можуть функціонувати ізольовано, забезпечуючи потреби й комфорт локальних споживачів, а в подальшому − навіть підтримувати роботу сусідніх мікромереж, які не мають можливості самозабезпечення.

ПОСИЛАННЯ

1. Abdelhameed, E. H., Abdelraheem, S., Mohamed, Y. S., Abouheaf, M., Marey, S. A., & Diab, A. A. Z. (2024). An enhanced energy management system for coordinated energy storage and exchange in grid-connected photovoltaic-based community microgrids. Journal of Energy Storage, 72, 113311. https://surl.li/rpxuwb

2. Wang, W., Li, C., He, Y., Bai, H., Jia, K., & Kong, Z. (2024). Enhancement of household photovoltaic consumption potential in village microgrid considering electric vehicles scheduling and energy storage system configuration. Energy, 311, 133330. https://surl.li/hxeumw

3. Tina, G. M., Maione, G., & Stefanelli, D. (2024). The impact of grid-forming vs. grid-following converters on frequency regulation: Comparing centralised or distributed photovoltaic generation. Energies, 17(23), 5827 https://surl.li/whoxnb

УДК 536.551.621

GEOSYN – GEOTHERMAL SYNERGY: ENHANCING INDUSTRIAL ENERGY EFFICIENCY THROUGH STEAM HIGH-TEMPERATURE HEAT PUMPS AND HEAT-POWERED COOLING SYSTEMS WITH OPERATIONAL FLEXIBILITY AND PUBLIC TRUST

Y. Demchuk[1], T. Popadynets[2]

[1] NGO "Geothermal Ukraine", 15 Karpatska Str., Ukraine, 76000, Ivano-Frankivsk city, tel: +380935315620, email: y.demchuk@geothermalukraine.org

[2] NGO "Geothermal Ukraine", 15 Karpatska Str., Ukraine, 76000, Ivano-Frankivsk city, tel: +380962435336, email: info@geothermalukraine.org

GEOSYN aims to validate a groundbreaking geothermal steam heat pump coupled with heat-powered refrigeration systems for industrial applications, specifically for the cascading use of heat from deep or shallow rock formations. The solution prioritises environmental sustainability, using water as the working fluid in all subsystems and anticipates improvements in cost-efficiency for geothermal application developments. The expected outcome is a substantial increase in the deployment of geothermal resources for heat and cold generation, offering enhanced efficiency, less environmental hazards, portability and more societal acceptance. By integrating with thermal energy storage systems, the GEOSYN technology will increase adaptability and operate with a variety of thermal sources, such as waste heat and geothermal sources at varying temperatures. The deployment of the GEOSYN innovation will be supported by awareness-raising and social acceptance campaigns.

Key words: *heat pumps, geothermal direct uses, geothermal resources, simultaneous heating and cooling, industry decarbonization, Horizon Europe, stakeholder engagement, public trust.*

GEOSYN – ГЕОТЕРМАЛЬНА СИНЕРГІЯ: ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ЗАВДЯКИ ВИКОРИСТАННЮ ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ ПАРОВИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ ТА СИСТЕМ ОХОЛОДЖЕННЯ, ПОБУДОВАНИХ НА ТЕПЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЯХ, З ГНУЧКІСТЮ В ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ВИСОКОЮ ДОВІРОЮ СУСПІЛЬСТВА

Ю. В. Демчук[1], Т. П. Попадинець[2]

[1]ГО "Геотермал Україна", вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна, тел.: +380935314620, email: y.demchuk@geothermalukraine.org

[2]ГО "Геотермал Україна", вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76000, Україна, тел.: +380962435336, email: info@geothermalukraine.org

Проєкт GEOSYN має на меті випробувати інноваційний геотермальний паровий тепловий насос у поєднанні з холодильними системами, що працюють на теплі, для промислового застосування, зокрема для каскадного використання тепла з глибоких та неглибоких геологічних формацій. Це рішення приділяє особливу увагу екологічній стійкості, використовуючи воду як робочу рідину у всіх підсистемах, і спрямоване на підвищення економічної ефективності геотермальних технологій. Розгортання інновації GEOSYN буде підтримуватися кампаніями з підвищення обізнаності та соціального визнання.

Ключові слова: *теплові насоси, пряме використання геотермальної енергії, геотермальні ресурси, одночасне опалення та охолодження, декарбонізація промисловості, Горизонт Європа, залучення зацікавлених сторін, громадська довіра.*

ORCID: [1]0000-0001-8703-4235, [2]0009-0004-6766-0633

The GEOSYN project aims to revolutionize industrial energy efficiency by integrating high-temperature geothermal energy into advanced heating and cooling (H&C) systems. Funded by the EU's Horizon Europe Programme (2024-2027), the project focuses on developing and demonstrating an innovative solution that combines steam-based high-temperature heat pumps with heat-powered cooling systems for industrial applications. By leveraging geothermal energy, the GEOSYN system provides both efficient high-temperature heating and cooling, optimizing energy use and reducing carbon

emissions across industries. The system proposed by GEOSYN integrates cutting-edge technology, including a high-temperature heat pump and a heat-driven chiller, both utilizing water as the refrigerant (Figure). This approach offers significant environmental benefits, such as lowering global warming potential, while enhancing operational flexibility through the incorporation of thermal energy storage and adaptability to various thermal sources, including waste heat and diverse geothermal temperatures.

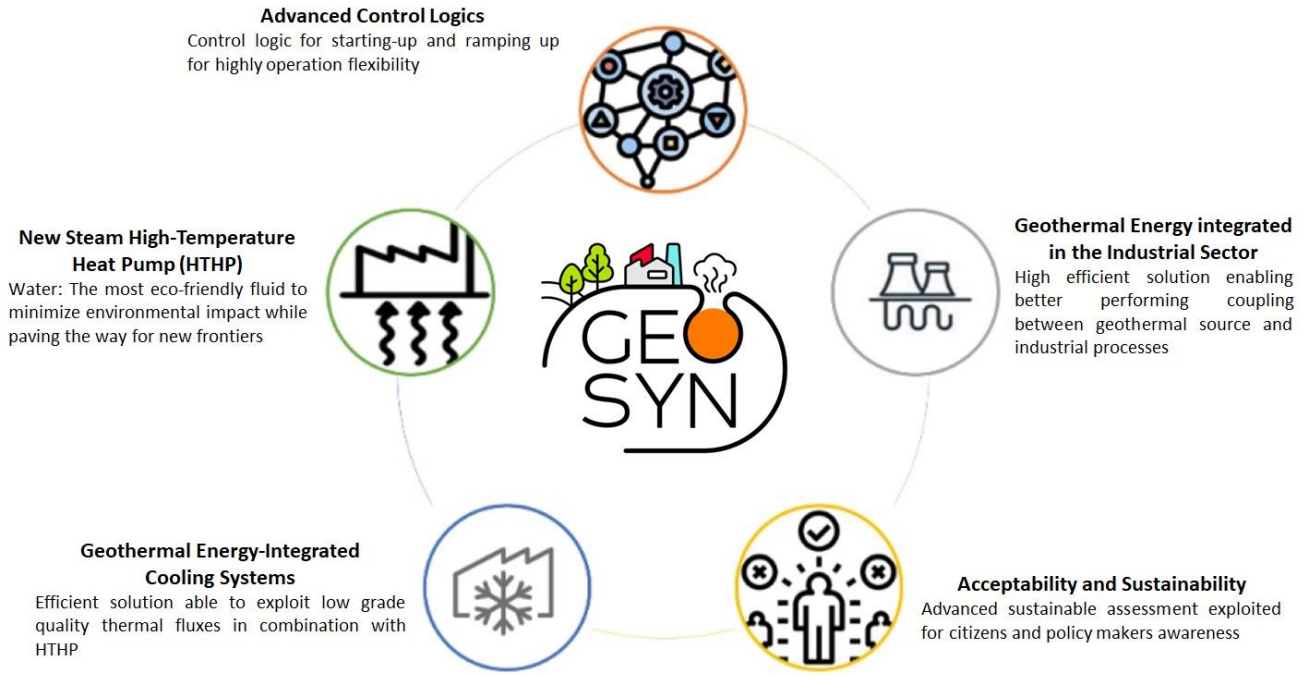


Figure. GEOSYN concept

In addition to technological innovation, the project emphasizes the importance of public trust and awareness in the adoption of geothermal solutions. The success of these innovations relies on strategic awareness-building and stakeholder engagement. Many institutions, local communities and industries remain unfamiliar with the potential benefits of geothermal H&C, which limits its widespread adoption. For geothermal technologies to gain acceptance, clear and targeted communication is vital. This includes addressing both the potential benefits and challenges, while listening to the concerns of key stakeholders, such as policy makers, businesses and local residents. By understanding the socio-economic conditions, attitudes and expectations of communities, GEOSYN can develop tailored communication strategies to effectively promote geothermal energy. These strategies will seek to mitigate concerns, highlight the advantages, and foster a deeper understanding of geothermal applications, thus encouraging local acceptance and participation in decision-making processes regarding infrastructure projects.

In addition to engaging local communities, the GEOSYN project aims to build trust among policymakers and industries by showcasing existing success stories, best practices, and the real-world feasibility of geothermal H&C applications. It also seeks to foster the integration of geothermal energy into national and regional policies. One of the project's key objectives is to inspire young women by providing female role models in the geothermal field, promoting entrepreneurship and encouraging future generations to pursue careers in renewable energy, specifically within geothermal H&C technologies. Lastly, by providing concrete examples of the environmental and financial benefits of the proposed technology in different contexts, GEOSYN will demonstrate that geothermal H&C is not only feasible but also an affordable solution for various production processes, reinforcing its viability as a sustainable, cost-effective energy alternative. The project seeks to position geothermal energy as a reliable, affordable, and sustainable solution for enhancing industrial energy efficiency while contributing to Europe's decarbonization goals.

REFERENCES

1. GEOSYN project website. Available online: www.geosynproject.eu

УДК 621.311.61

ЗМЕНШЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВИТРАТ АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА

М. А. Коваленко[1], І. Я. Коваленко[2].

Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,
03056, м. Київ, просп. Берестейський, 37,
Тел. +38-067-656-36-51, e-mail: kovalenko_ma@i.ua

Проведено аналіз використання джерела безперебійного живлення сумісно з автономним дизель/бензиновим електрогенератором з метою зниження експлуатаційних витрат. Використання ДБЖ дозволяє знизити експлуатаційні витрати за рахунок навантаження генератора до оптимального значення, 75–80 % номінального, економії палива, зменшення інтервалів та періодичності технічного обслуговування та шкідливих викидів в атмосферу.

Ключові слова: *автономний електрогенератор, безперебійне живлення, автономні дизель-бензинові електроустановки, відновлювальна енергетика, електромеханічний перетворювач.*

REDUCTION OF OPERATING COSTS OF A AUTONOMOUS ELECTRIC GENERATOR

M. Kovalenko[1], I. Kovalenko[2]

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Beresteysky Ave., Kyiv, 03056
Tel./fax +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko_ma@i.ua.

An analysis of the use of an uninterruptible power supply in combination with an autonomous diesel/gasoline generator was conducted to reduce operating costs. The use of a UPS allows you to reduce operating costs by loading the generator to an optimal value of 75-80% of the nominal, saving fuel, reducing maintenance intervals and frequency, and reducing harmful emissions into the atmosphere.

Keywords: *autonomous electric generator, uninterruptible power supply, autonomous diesel-petrol power plants, renewable energy, electromechanical converter.*

ORCID: [1]0000-0002-5602-2001; [2]0000-0003-1097-2041.

Автономні електроенергетичні установки, зокрема автономні дизель-бензинові електрогенерувальні пристрої, є важливим джерелом енергопостачання різноманітних об’єктів [1]. Вони використовуються при аварійних відключеннях світла, проведенні ремонтних робіт, при нестабільному централізованому живленні як резервні джерела живлення. Окремою сферою використання таких систем є віддалені від загальної електромережі об’єкти або автономні об’єкти (судна, потяги, транспортні засоби і т. ін.) [2].

Одним із ефективних способів оптимізації роботи електрогенераторів є інтеграція з джерелами безперебійного живлення (ДБЖ) [3]. Використання ДБЖ дозволяє не лише забезпечити безперервність електропостачання, але й значно зменшити експлуатаційні витрати завдяки зниженню навантаження на генератор і раціоналізації використання палива двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) [4].

Вартість виробленого кВт змінного струму в разі використання інвертора є дорожчим, ніж в разі використання генератора [5]. Це пояснюється більшою вартістю системи ДБЖ із акумуляторами порівняно з вартістю генератора необхідної потужності. Додавати інвертор до системи генератора змінного струму необхідно не лише для зниження шуму від його роботи та роботи ДБЖ при відносно невеликих (≈0–30 %) навантаженнях, а й задля економії палива, економії коштів і часу за рахунок збільшення інтервалів технічного обслуговування, подовження терміну служби генератора в цілому, цілодобової доступності живлення змінного струму.

Основна ідея використання ДБЖ сумісно з автономним електрогенератором полягає в тому, щоб зменшити час роботи генератора під високими навантаженнями або в разі короткочасних відключень основного живлення. При такому рівні навантаження електрогенерувальна установка має найбільш оптимальне співвідношення вартості виробленого кВт і витрати палива, л/год [6].

На рис. 1 наведено структурну схему системи безперебійного живлення електроустановок на основі ДБЖ.

Система працює таким чином: при наявності мережі живлення через магнітний контактор 4 надходить до входу (In) ДБЖ і транзитом проходить на навантаження (Out). При цьому система моніторингу стану АКБ (БМ) відслідковує

стан та рівень заряду АКБ. У разі потреби живлення споживачів відбувається від АКБ, або відбувається заряджання АКБ за рахунок енергії, що поступає від мережі. Багатофункціональна панель контролю виконує онлайн-моніторинг стану системи, зокрема визначає величину та характер навантаження, рівень заряду АКБ, та дозволяє полегшити програмування параметрів роботи системи в цілому.

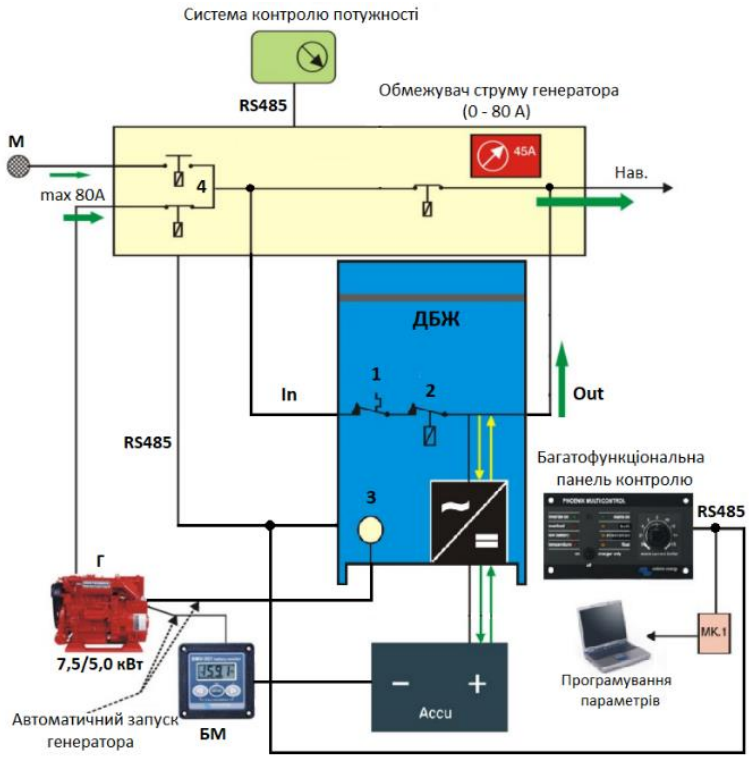


Рис. 1. Конфігурація системи безперебійного живлення на основі ДБЖ: 1 – вбудоване теплове реле; 2 – захисне (аварійне) реле; 3 – мультифункціональний додатковий вхід ДБЖ; 4 – перемикач вводу (система АВР); Г – автономний генератор; БМ – система моніторингу стану АКБ

При систематичних відключеннях, сумісно із ДБЖ, зменшення експлуатаційних витрат становить ≈39 %. У разі екстрених та аварійних відключень електроенергії заощадження становить ≈76 %. Весь інший час живлення відбувається за рахунок енергії АКБ. У цьому разі заряджання АКБ може здійснюватися як від мережі, так і від електрогенератора. Окремої уваги заслуговує зменшення впливу на навколишнє середовище внаслідок зменшення шкідливих відходів вихлопу та моторної оливи.

ПОСИЛАННЯ

1. Golovko V. M. Mathematical simulation of autonomous wind electric installation with magnetoelectric generator / V. M. Golovko, M. Ya. Ostroverkhov, M. A. Kovalenko, I. Ya. Kovalenko, D. V. Tsyplenkov. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2022, (5): 074–079. https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-5/074.

2. Chumack V. Voltage stabilization of a controlled autonomous magnetoelectric generator with a magnetic shunt and permanent magnet excitation / V. Chumack, V. Bazenov, O. Tymoshchuk, M. Kovalenko, S. Tsyvinskyi, I. Kovalenko, I. Tkachuk. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 6(5 (114), 56–62. (ISSN 1729-3774).

3. Чумак В. Порівняння синхронних генераторів для автономної бензинової установки / Чумак В., Коваленко М., Ткачук І., Коваленко І. Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика, (2 (8), 32–38. https://doi.org/10.20998/2079-3944.2022.2.06.

4. Ismagilov, Flur & Khayrullin, Irek & Vavilov, Viacheslav & Bekuzin, Vladimir & Ayguzina, Valentina. (2017). Increasing Energy Parameters of High-Speed Magneto-Electric Generator for Autonomous Objects. International Review of Aerospace Engineering (IREASE). 10. 74. doi: 10.15866/irease.v10i2.11708.

5. Quliyev, Huseyngulu & Ibrahimov, Famil & Mammadov, Zaur. (2024). Determination of optimal dimensions of hybrid AC/DC distributed generation system with renewable sources for autonomous power supply of remote locations. E3S Web of Conferences. 584. 01020. doi: 10.1051/e3sconf/202458401020.

6. Khan A., Javaid N., Javaid S. Optimum unitsizing ofstand – alone PV-WT battery hybrid system componentsusing jaya. In: Proceedings of the 2018 iEEE 21 st.International multi Topic Conference, 2018, Nov. 1-2,Karachi, Pakistan, pp. 1–8. doi: 10.1109/inmic.2018.8595678.

УДК 621.316.9

ОГЛЯД ПРОБЛЕМИ УШКОДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНИХ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГИ ВНАСЛІДОК УДАРІВ БЛИСКАВКИ

Є. О. Троценко[1], Я. А. Архипов[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

Нелінійні обмежувачі перенапруги мають захищати електричні мережі від імпульсів перенапруги, спричинених ударами блискавки. Однак екстремальні умови, як-от часті удари блискавки та велика сила струму розряду, можуть призвести до їх ушкодження та виходу з ладу. У цьому дослідженні проведено аналіз основних факторів ризику та методів підвищення надійності захисту від перенапруги.

Ключові слова: *багатократні удари блискавки, зимова блискавка, нелінійні обмежувачі перенапруги, перенапруга, повітряні лінії електропередачі.*

OVERVIEW OF THE PROBLEM OF DAMAGE TO SURGE ARRESTERS DUE TO LIGHTNING STRIKES

Y. Trotsenko[1], Y. Arkhypov[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (044) 204-92-39, e-mail: trotsenko2014@gmail.com

Nonlinear surge arresters are designed to protect electrical networks from overvoltage impulses caused by lightning strikes. However, extreme conditions such as frequent lightning strikes and high discharge current can lead to their damage and failure. This study analyzes the main risk factors and methods for improving surge protection reliability.

Key words: *multiple lightning strikes, winter lightning, surge arresters, overvoltage, overhead power lines.*

ORCID: [1]0000-0001-9379-0061; [2]0009-0003-6396-3189

Нелінійний обмежувач перенапруги – це захисний електричний апарат, призначений для обмеження рівня перенапруги в електромережах, зокрема при короткочасних імпульсах високої напруги, спричинених ударами блискавки або комутаціями в електричних системах. Його основна функція полягає у зниженні надмірної напруги до безпечного рівня, що захищає чутливі елементи електричних систем, обладнання та споживачів від пошкоджень. Проте, навіть попри свою захисну роль, нелінійний обмежувач перенапруги може зазнати руйнування внаслідок надмірного навантаження або частих ударів блискавки, які спричиняють деградацію його матеріалів і компонентів. У разі виснаження ресурсу або неспроможності впоратися з екстремальними умовами ефективність захисту знижується, що може поставити під загрозу безпеку всієї електричної системи. Причини виходу з ладу обмежувачів перенапруги можуть бути різноманітними та потребують детального аналізу.

Лінії електропередачі (ЛЕП) можуть проходити через гірську місцевість або бути розташованими на вершинах гір. За таких географічних умов збільшується ймовірність ураження блискавкою, оскільки високі точки земної поверхні вразливіші до влучання блискавки. У таких умовах обмежувачі перенапруги працюють у значно складнішому режимі, адже змушені витримувати більшу кількість та інтенсивність імпульсів перенапруги, спричинених грозовою активністю [1]. Це істотно підвищує навантаження на захисні пристрої та вимагає їхньої високої надійності. Особливо часто сплески перенапруги, спричинені блискавкою, виникають на ЛЕП, прокладених у районах з високою грозовою активністю та підвищеним питомим опором ґрунту. Це особливо актуально для ЛЕП, що йдуть від вітрових електростанцій (ВЕС), розташованих у таких грозових зонах. Коли блискавка влучає в повітряну ЛЕП, хвиля перенапруги може поширюватися не лише по самій ЛЕП, а й по кабельних мережах ВЕС. Висока частота ударів блискавки та специфіка місцевих умов призводять до того, що обмежувачі перенапруги, які використовуються для захисту кабельних ліній ВЕС, можуть зазнавати надмірних навантажень і виходити з ладу [2]. Це спонукає до пошуку ефективних рішень для підвищення надійності захисту від перенапруги. Так, одним зі способів підвищення ефективності нелінійних обмежувачів перенапруги є встановлення декількох обмежувачів з практично ідентичною

вольт-амперною характеристикою паралельно, що дозволяє розподілити струм удару і забезпечити стабільніший захист від перенапруги [3]. Важливу роль відіграє й відстань між місцем прямого удару блискавки в повітряну ЛЕП та місцем встановлення обмежувача перенапруги. Чим ближче місце удару, тим більша енергія, яку має поглинути обмежувач перенапруги, що своєю чергою може призвести до його перевантаження або навіть пошкодження [4].

Сильні удари блискавки, що переносять надзвичайно великий електричний заряд, можуть спричиняти руйнування нелінійних обмежувачів перенапруги, перевищуючи їхню розрахункову енергоємність. Особливо небезпечними є удари зимової блискавки, які характеризуються високою амплітудою струму та тривалістю імпульсу. Це явище традиційно спостерігається в Японії, де воно завдає значних проблем енергетичній інфраструктурі [5, 6]. Однак упродовж останніх років зимові блискавки дедалі частіше реєструються і в країнах Європи [7], що підкреслює актуальність дослідження їхнього впливу на засоби блискавкозахисту. Особливу небезпеку становлять так звані багатократні удари блискавки (англ. multiple lightning strokes), під час яких генерується серія імпульсів, що суттєво підвищує ризик термічного та електричного перевантаження нелінійних обмежувачів перенапруги [8]. Такі удари блискавки являють небезпеку як для розподільних, так і магістральних електричних мереж [9].

Отже, можна сказати, що захист повітряних ЛЕП від блискавки має певне відношення до енергоефективності, хоча це не є його основною метою. Надійний блискавкозахист зменшує ймовірність аварійних відключень, пошкоджень обладнання і втрат електроенергії через аварії. Це своєю чергою сприяє підвищенню загальної ефективності електроенергетичної системи, оскільки дозволяє уникнути додаткових витрат на ремонт, заміну обладнання та компенсацію енергетичних втрат. Крім того, стабільна робота ЛЕП без частих перебоїв знижує втрати при передаванні електроенергії, що також є важливим аспектом енергоефективності.

ПОСИЛАННЯ

1. H. Sugimoto, T. Kosuge, S. Yokoyama, K. Okumura, "Study of lightning protection of power distribution lines located in mountainous areas", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Yokohama, Japan, 2002, vol. 2, pp. 677-682, doi: 10.1109/TDC.2002.1177554.
2. N. Malcolm, R. Aggarwal, "Mitigation of transient overvoltages under lightning in networks with wind farms connection using MOV surge arresters", 2013 IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672079.
3. H. Sugimoto, A. Asakawa, S. Yokoyama, K. Nakada, "Effectiveness of installing two pairs of distribution surge arresters in parallel", 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, London, UK, 1999, vol. 2, pp. 246-249, doi: 10.1049/cp:19990640.
4. J. Cao, Y. Du, Y. Ding, Z. Li, Y. Zhang, "Novel evaluation of the damage rate of surge arresters due to lightning stroke in a distribution network," 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2022, pp. 76-81, doi: 10.1109/ICLP56858.2022.9942475.
5. Y. Matsuda, K. Michishita, S. Yokoyama, T. Sato, "Analysis of surge arrester damage accident on distribution line due to winter lightning", 2019 11th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Hong Kong, China, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/APL.2019.8816054.
6. K. Michishita, T. Omura, S. Yokoyama, K. Takano, M. Ikuta, M. Matsui, "Arrester damage on 6.6 kV power distribution line in Japan by winter lightning", 2021 35th International Conference on Lightning Protection (ICLP) and XVI International Symposium on Lightning Protection (SIPDA), Colombo, Sri Lanka, 2021, pp. 01-04, doi: 10.1109/ICLPandSIPDA54065.2021.9627344.
7. K. Lenarczyk, M. Loboda, "Shutdowns of 220 kV and 400 kV power transmission lines caused by winter lightning strikes in Poland in January 2022", 2022 36th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Cape Town, South Africa, 2022, pp. 20-25, doi: 10.1109/ICLP56858.2022.9942605.
8. L. Huang, L. Zhou, W. Chen, R. Wei, D. Zhang, D. Wang, H. Zhao, Y. Ma, "Analysis of thermal effects for polymer-housed metal-oxide surge arrester under multiple strokes", IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, vol. 37, no. 5, pp. 3917-3927, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3141397.
9. T. Tsuboi, J. Takami, S. Okabe, T. Kido and T. Maekawa, "Energy absorption capacity of a 500 kV surge arrester for direct and multiple lightning strokes", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, vol. 22, no. 2, pp. 916-924, doi: 10.1109/TDEI.2015.7076792.

УДК 532.516; 532.526

ВИКОРИСТАННЯ ПЛАЗМОВИХ АКТУАТОРІВ У СКЛАДІ ГОРИЗОНТАЛЬНО-ОСЬОВИХ ВЕУ

Д. О. Редчиць[1], В. Ю. Скосар[2]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

Проаналізавоно можливість використання плазмових актуаторів у складі горизонтально-осьових вітрових турбин. Показано, що плазмові актуатори на роторних лопатях здатні підвищити середню потужність вітрової турбини, зменшити аеродинамічне навантаження і шум.

Ключові слова: *вітроенергетичні установки, плазмові актуатори, повітряні потоки, екологічність, енергоефективність.*

USE OF PLASMA ACTUATORS AS PART OF HORIZONTAL-AXIS WIND TURBINES

D. Redchyts[1], V. Skosar[2]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5 Pisargevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005
phone: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

The possibility of using plasma actuators as part of horizontal-axial wind turbines is analyzed. It has been shown that plasma actuators on rotor blades can increase the average power of a wind turbine and reduce the aerodynamic load and noise.

Key words: *wind turbines, plasma actuators, air currents, environmental friendliness, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0001-8538-6026; [2]0000-0002-2151-3417

Роторні лопаті на сучасних вітрових турбінах здебільшого сконструйовані з додатковими рухомими поверхнями й використовують дорогі й складні системи управління нахилом для підтримки контролю за несприятливих умов вітру, як-от пориви, змінні швидкості тощо. Все це обмежує ефективність вітроенергетичної установки (ВЕУ), призводить до високих капітальних витрат. Тому передові розробки спрямовано на інноваційні технології плазмових аеродинамічних актуаторів для покращення продуктивності вітрових турбін. Плазмові актуатори на лопатях ротора дозволяють покращити захоплення енергії та зменшити аеродинамічне навантаження, зменшити шум за допомогою керування потоком. Плазмові актуатори забезпечують можливість змінювати аеродинамічні навантаження на лопаті вітрової турбіни без рухомих поверхонь. Крім того, це дає змогу зменшити вагу лопатей та зменшити складність, що дозволить істотно знизити вартість [1].

Схему конструкції плазмового актуатора наведено на рис. 1. Актуатор вбудований прямо в лопать. Завдякі його роботі генерується індукований потік плазми, як вказано на рис. 1. Цей потік спрямований паралельно поверхні лопаті й суттєво впливає на потокі повітря поблизу лопати ротору. Тобто відбувається активне керування потоками повітря поблизу лопатей, де працюють плазмові актуатори [1].

Теоретичний аналіз роботи плазмових актуаторів з урахуванням динаміки рідини газу та низькотемпературної плазми проведено в [2]. Як приклад, в [3] проведено чисельне моделювання турбулентних потоків повітря, які обтікають профіль по типу лопатей ротору. І хоча це непрості задачи, та все-таки вдається досягти активного керування аеродинамічними потоками на практиці.

Активне керування потоком зазвичай стосується використання залежного від часу (часто періодичного) збурення, яке вводиться в поле потоку так званими приводами. Система активного контролю потоку включає приводи потоку, датчики потоку і логіку управління для використання інформації датчика про стан потоку (відокремлений або приєднаний) і секційне навантаження для приводів потоку для досягнення бажаної переваги продуктивності. Сьогодні існує безліч пристроїв для регулювання потоку, які можна використовувати на вітряній турбіні; наприклад: мікровиступи, всмоктування, видування, синтетичні струмені та аеродинамічні профілі зі змінним вигином з пам'яттю форми матеріалів. Але плазмовий актуатор з діелектричним бар'єрним розрядом пропонує найбільші перспективи для керування потоком вітрової турбіни [1].

Що стосується розміщення плазмових актуаторів, то на рис. 2 вказано таке розташування на лопатях. Тобто плазмови актуатори виглядають як смуги, що розташовані паралельно до кромок лопатей.

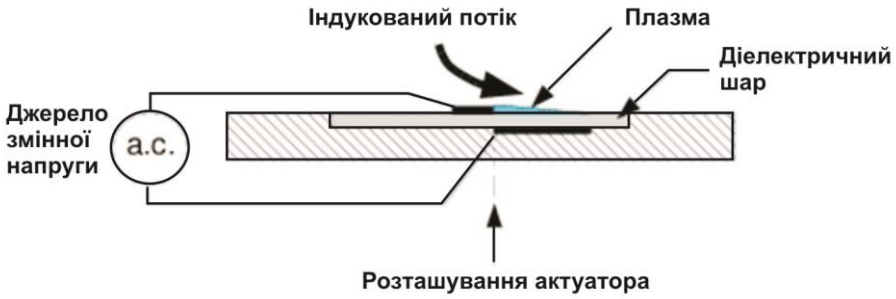


Рис. 1. Схема конструкції плазмового актуатора [1]

Також потрібно враховувати інформацію щодо живлення плазмових актуаторів, наприклад роботи. Для плазмового актуатора потрібно лише 13 Вт на погонний метр лопатф ротора [1].

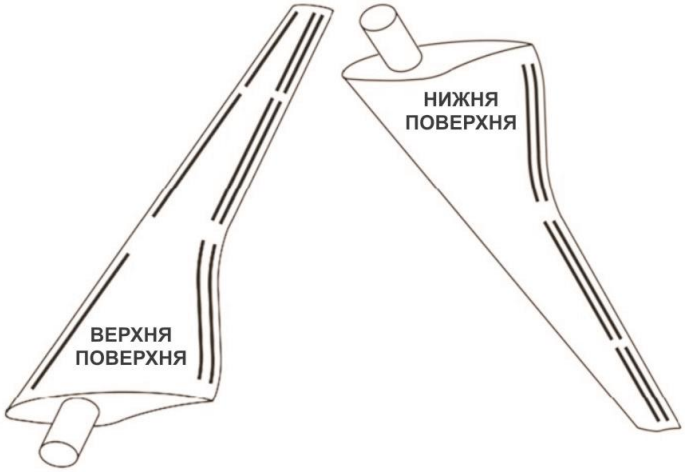


Рис. 2. Схема розташування плазмових актуаторів на лопатях [1]

Очікується, що потужність, необхідна для роботи системи плазмових актуаторів на вітровій турбіні, буде невеликою часткою електроенергії, виробленої самою вітровою турбіною. Наприклад, 3-лопатева вітряна турбіна з діаметром 50 м зазвичай може генерувати понад 700 кВт енергії за швидкості вітру 10 м/с, при цьому для роботи плазмових актуаторів потрібно лише 2,55 кВт. Це менше 0,4 % загальної кількості потужності, що розвивається вітровою турбіною. Типовий блок електроніки має приблизно 75 % ефективності, тобто для забезпечення 13 Вт на погонний метр необхідна загальна потужність 17 Вт на погонний метр лопаті турбіни. Три лопаті по 50 м дорівнюють 150 лінійним метрам, і при 17 Вт на метр буде потрібно 2550 Вт потужності. Навіть якщо кілька рядів плазмових актуаторів на лопаті використовуються, не всі актуатори працюватимуть одночасно. Джерело живлення, яке використовується плазмовою електронікою, звичайно становить ±24 В постійного струму. Практично будь-яке джерело живлення можна перетворити на ±24 В постійного струму [1].

Таким чином, ми бачимо, що використання плазмових актуаторів є реальною справою. Але необхідно вказати виграш.

У дослідженні [4] проведено експериментальний тест щодо ефективності плазмових актуаторів на горизонтально-осьовий ВЕУ з трьома лопатями (діаметр ротоау 66 м), номінальною потужностью 1,75 МВт. Плазмові актуатори були розташовані на поверхні передньої кромки кожної лопаті. Тест проводили протягом 6 діб. Дослідження продемонструвало, що виграш у середній потужності вітрової турбіни досягав 4,9 %. Загальне споживання електроенергії для роботи плазмових актуаторів було менше 1 кВт, тобто всього 0,06 % номінальної потужності.

Отже, теоретичні розрахунки та експеримент підтверджують перспективність використання плазмових актуаторів на горизонтально-осьових ВЕУ.

Автори планують продовжити дослідження й розглянути перспективність використання плазмових актуаторів на вертикально-осьових ВЕУ.

ПОСИЛАННЯ

1. Plasma Aerodynamic Control Effectors for Improved Wind Turbine Performance. Phase I SBIR Final Report (August 2008). URL: https://www.osti.gov/biblio/1007921 (дата звернення: 28.02.2025).
2. Редчиць Д. О. Нестаціонарні зв'язані задачі динаміки рідини, газу та низькотемпературної плазми. Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація д-ра фіз.-мат. наук: 01.02.05 / Редчиць Дмитро Олександрович ; НАН України, Ін-т гідромеханіки. Київ, 2020. URL: https://www.google.com/url?esrc=s&q=&rct=j&sa=U&url=http://hydromech.org.ua/content/pdf/theses/Redchyts_2020-Diss.pdf&ved=2ahUKEwiQtsjQob6DAxW0g_0HHbMnCl4QFnoECAEQAg&usg=AOvVaw1vJRXB9luIXprPsxvFXsfo (дата звернення: 28.02.2025).
3. Редчиць Д. О., Моісеєнко С. В., Акіменко О. В. Чисельне моделювання докритичного і за критичного обтікання профілю турбулентним потоком. Математичне моделювання. 2024. № 2(51). С. 132−144. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(51)2024.317613.
4. Hisashi Matsuda, et. al. Plasma Actuation Effect on a MW class Wind Turbine. International Journalof Gas Turbine, Propulsion and Power Systems. 2017. Vol. 9. № 1. P. 47−52. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/jgpp/9/1/9_47/_pdf (дата звернення: 28.02.2025).

УДК 656.4; 621.3; 625.1/.5

ШВИДКІСНИЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТ НА МАГНІТНІЙ ПОДУШЦІ

В. Ю. Скосар[1], Ю. В. Шкіль[2]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

Для підвищення енергоефективності електричного транспорту, який рухається залізничними рейками, передові іноземні стартапи намагаються розробити магнітолевітаційні транспортні засоби, які здатні використовувати звичайну залізничну колію. Автори викладають результати власних напрацювань у зазначеному напрямі.

Ключові слова: *магнітна левітація, постійні супермагніти, залізнічні рейки, трамвай, електропоїзд, зменшення опору руху, енергоефективність.*

HIGH-SPEED ELECTRIC TRANSPORT ON A MAGNETIC LEVITATION

V. Skosar[1], Yu. Shkil[2]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5 Pisargevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005
phone: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

In order to increase the energy efficiency of electric transport that moves on railway tracks, advanced foreign startups are trying to develop magnetic levitation vehicles that are able to use a regular railway track. The authors present the results of their own work in the specified direction.

Key words: *magnetic levitation, permanent supermagnets, railway rails, tram, electric train, reducing movement resistance, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0002-2151-3417; [2]0000-0002-8684-5906

Одним з перспективних напрямів підвищення енергоефективності є перехід наземних транспортних засобів на технології магнітної левітації. Порівняно з поїздами і трамваями на колесах, це дасть змогу знизити втрати енергії, пов'язані з тертям колісних пар об рейки, а також знизити експлуатаційні витрати, пов'язані зі зношуванням колісних пар і рейок.

У цьому контексті інтерес становлять технології, які розробляють італійська фірма IronLev [1, 2] і польська фірма Nevomo [3−5]. В обох випадках робляться спроби створити магнітолевітаційний транспорт, здатний левітувати над уже наявною рейковою колійною структурою. При цьому розробка Nevomo все ж таки передбачає будівництво додаткової смуги, паралельної рейкам, яка, ймовірно, виконуватиме функції статора лінійного електродвигуна [3−5]. Щодо розробки IronLev, то нам невідомо як забезпечені розгін і гальмування транспорту. Також невідомо, як розробники обох стартапів забезпечили магнітну левітацію. Це є know-how обох стартапів. Відомо лише, що розробники з IronLev [1, 2] використовують супермагніти для левітації над рейками.

Автори викладуть тут результати власних напрацювань у зазначеному напрямі. Запропонована нами система магнітної левітації виглядає так, як зображено на рис. 1. Супермагніти вбудовані в слайдер, якій є частиною транспортного засобу. Геометрія розташування супермагнитів забезпечує ефект магнітної левітації над феромагнітною рейкою. Бічні коліщатка забезпечують бічну стабільність транспортного засобу.

Річ у тому, що, як показують попередні розрахунки та експеримент, у вертикальному напрямку ефект відштовхування слайдера від рейки стійкий, а бічне становище слайдера нестійке, тому необхідні бічні коліщатка для стабілізації слайдера. Однак навантаження на бічні коліщатка й відповідна сила тертя будуть значно меншими, ніж навантаження на колеса звичайного потягу й відповідна сила тертя, оскільки в останньому випадку навантаження визначено вагою вагона.

Але постає питання розгону й гальмування транспортного засобу. Це питання автори пропонують вирішувати в такий спосіб, спираючись на досвід сучасних швидкісних трамваїв. Наприклад, відомо, що в деяких країнах використовують швидкісні трамваї для перевезення пасажирів. Також швидкісні трамваї є в Києві [6]. Технічні параметри

такого швидкісного трамваю автори беруть за основу (рис. 2, зверху) і трансформують цей транспортний засіб у магнітолевітаційний транспорт (рис. 2, знизу).

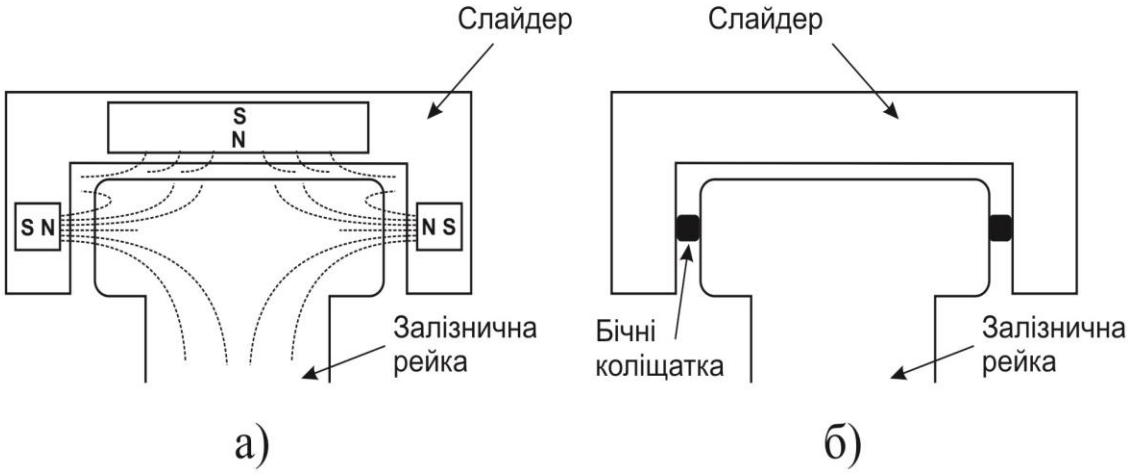


Рис. 1. Принципова схема магнітної левітації над рейкою

Як ми бачимо на рис. 2 (знизу), магнітолевітаційний транспорт буде «гібридним», тобто пасажирські вагони левітуватимуть над залізничними рейками, а перша й остання кабини з колесами виконуватимуть функцію тяги: розгону й гальмування.

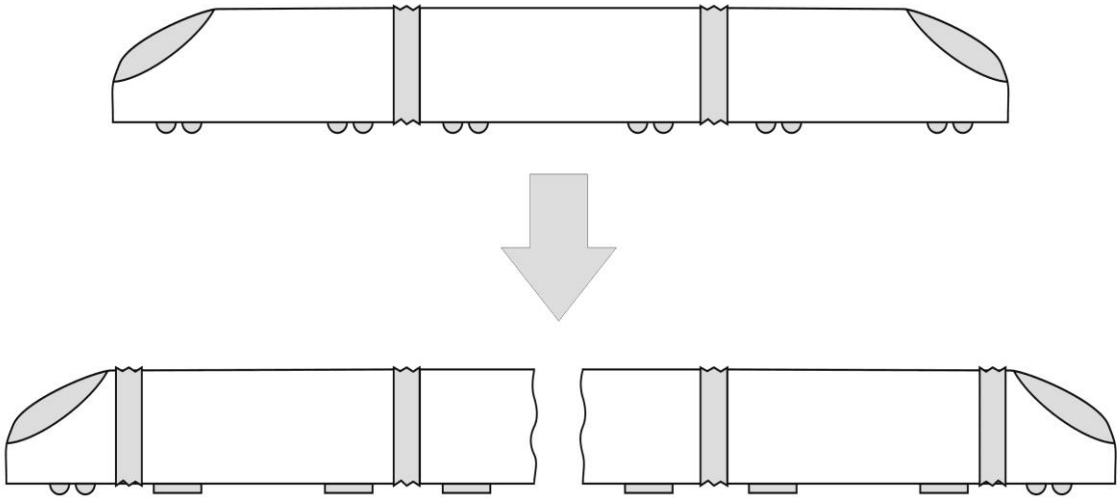


Рис. 2. Схема трансформації конструкції трамваю у конструкцію магнітолевітаційного транспорту

Проведемо попередні оцінки. У порівнянні з трамваєм (рис. 2, зверху) колеса першої та останньої кабин (рис. 2, знизу) забезпечать тягове зусилля приблизно у 2 рази більше. Це пов’язано з додатковою силою магнітного тяжіння намагнічених коліс до намагнічених рейок і, відповідно, у 2 рази більшою силою зчеплення колес і рейок. Сила тертя левітуючих пасажирських вагонів (рис. 2, знизу) буде приблизно в 5 разів менше, ніж сила тертя пасажирських вагонів на колесах (рис. 2, зверху), оскільки левітуючі вагони характеризуються меншою силою тертя. Отже, при більшому в 2 рази тяговому зусиллі й менший у 5 разів силі тертя ми маємо можливість збільшити кількість пасажирських вагонів у 10 разів! А це означає, з огляду на характеристики трамваю (рис. 2, зверху), що в нашому гібридному магнітолевітаційному транспорті буде 10−20 вагонів (за інших рівних умов).

Запропонований гібридний електротранспорт на магнітному підвісі може слугувати прототипом швидкісного трамваю, або електропоїзду. При цьому він зможе рухатися звичайними залізничними коліями.

Автори планують продовжити дослідження, з метою розробки більш ефективного і стійкого забезпечення розгону й гальмування магнітолевітаційного транспорту.

ПОСИЛАННЯ

1. Шевченко Н. Італійський стартап IronLev випробував потяг на магнітній подушці на звичайній залізниці (15.03.2024). URL: https://tokar.ua/read/96685/lowcost-passive-maglev-upgrade-tested-on-regular-rail-tracks (дата звернення: 28.02.2025).
2. Magnetic Levitation Made Simple And Affordable: A Revolutionary View On The Future Of Transportation. URL: https://www.ironlev.com/transport (дата звернення: 28.02.2025).
3. Дар'я Балагурчик. Система магнітної левітації MagRail дозволить поїздам зависати над звичайними залізничними коліями на швидкості 550 км/год (13.10.2023). URL: https://sundries.ua/systema-mahnitnoi-levitatsii-magrail-dozvolyt-poizdam-zavysaty-nad-zvychajnymy-zaliznychnymy-koliiamy-na-shvydkosti-550-km-hod/ (дата звернення: 28.02.2025).
4. MagRail - a new, innovative technology by Nevomo. URL: https://youtu.be/fYvIAlWM_HY?si=x8tEveILQUO3cuVf (дата звернення: 28.02.2025).
5. World's first levitating train on existing infrastructure! MagRail by Nevomo. URL: https://youtu.be/CQOEP7_euXQ?si=HSoKfdJUS5fIRc55 (дата звернення: 28.02.2025).
6. Вероніка Киреєва. На лівому березі запустили нові сучасні трамваї українського виробництва: фото (22.12.2023). URL: https://tykyiv.com/news/na-livomu-berezi-zapustili-novi-suchasni-tramvayi-ukrayinskogo-virobnitstva-foto/ (дата звернення: 28.02.2025).

УДК 628.3; 628.1; 621.6

КАВІТАЦІЙНА ОБРОБКА СТІЧНИХ ВОД

В. Ю. Скосар[1], Ю. О. Жулай[2], С. В. Комаров[3], С. В. Бурилов[4]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

Наслідком глобального потепління стає дефіцит прісної води, що зростає. Кавітаційна обробка стічних вод з додаванням невеликої кількості хімічних реагентів може суттєво покращити ситуацію з дефіцитом чистої прісної води.

Ключові слова: *кавітаційна обробка, гідродинамічна кавітація, стічні води, очищення води, екологічність, енергоефективність.*

CAVITATION WASTEWATER TREATMENT

V. Skosar[1], Yu. Zhulay[2], S. Komarov[3], S. Burylov[4]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5 Pisargevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005
phone: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

A consequence of global warming is a growing shortage of fresh water. Cavitation treatment of wastewater with the addition of a small amount of chemical reagents can significantly improve the situation with the shortage of clean fresh water.

Key words: *cavitation treatment, hydrodynamic cavitation, wastewater, water purification, environmental friendliness, energy efficiency.*

ORCID: [1]0000-0002-2151-3417; [2]0000-0001-7477-2028; [3]0000-0002-6065-9478; [4]0000-0001-8070-6764

Кліматична криза сьогодні проявляється не тільки у вигляді підвищення середніх температур, а й у формі частих посух і зростання дефіциту чистої прісної води. Дослідники попереджають, що над людством нависла серйозна загроза: запаси прісної води на планеті скорочуються. Вчені дійшли висновку, що глобальне потепління могло відіграти головну роль у частих посухах. Річ у тому, що глобальне потепління призводить до екстремальних опадів, але коли опадів занадто багато, вони не вбираються, а просто стікають, не поповнюючи ґрунтові води. Крім того, підвищення температури збільшує випаровування води з поверхні в атмосферу, але також збільшує водоутримувальну здатність атмосфери. А це збільшує частоту та інтенсивність посух [1, 2].

Одним зі шляхів протидії цій небезпечній тенденції є заходи з ефективного очищення стічних вод. Що краще ми зможемо очищати використану (стічну) воду, то менше у нас буде дефіцит чистої прісної води в навколишньому середовищі. Це явно випливає з умов глобального кругообігу води в природі.

На нашу думку, кавітаційна обробка стічних вод є одним з найперспективніших та енергоефективних способів очищення стічних вод. Наприклад, відомий позитивний досвід очищення стічних вод жиркомбінату від органічних забруднень [3]. Ефект від кавітаційного очищення може бути посилено за рахунок додавання невеликих кількостей хімічних реагентів, наприклад гіпохлорита натрію, або барботування газами [3]. Механізм впливу кавітації на забруднення та мікроорганізми пов’язаний з екстремальними умовами, які генеруються при колапсі кавітаційних каверн: високими температурами, високим тиском, іонізацією молекул води та речовин, які містяться у воді. Максимум температур всередині каверн (до 10^4 °С) і максимум тиску (до 10^8 Па) досягаються на короткий час (~10^{-6} с) у момент кінця колапсу [4]. Пік тиску (і температур) досягається як унаслідок симетричного колапсу сферичних кавітаційних каверн, так і при несиметричному колапсі з утворенням кумулятивних мікроструменів. На рис. 1 наведено 4 послідовних фото несиметричного колапсу кавітаційної каверни, яка спочатку мала сферичну форму. Зображення взято з загальнодоступного ресурсу Youtube.com [5]. Кумулятивний мікрострумень, якій видно на фото 2–4 (рис. 1), здатний руйнувати молекули забруднювальних речовин і патогенни мікроорганізми за рахунок інтенсивного удару, високої температури, іонизації. Але він також здатний руйнувати стінки самої кавітаційної установки (на рис. 1 мікрострумень б’є в нижню стінку).

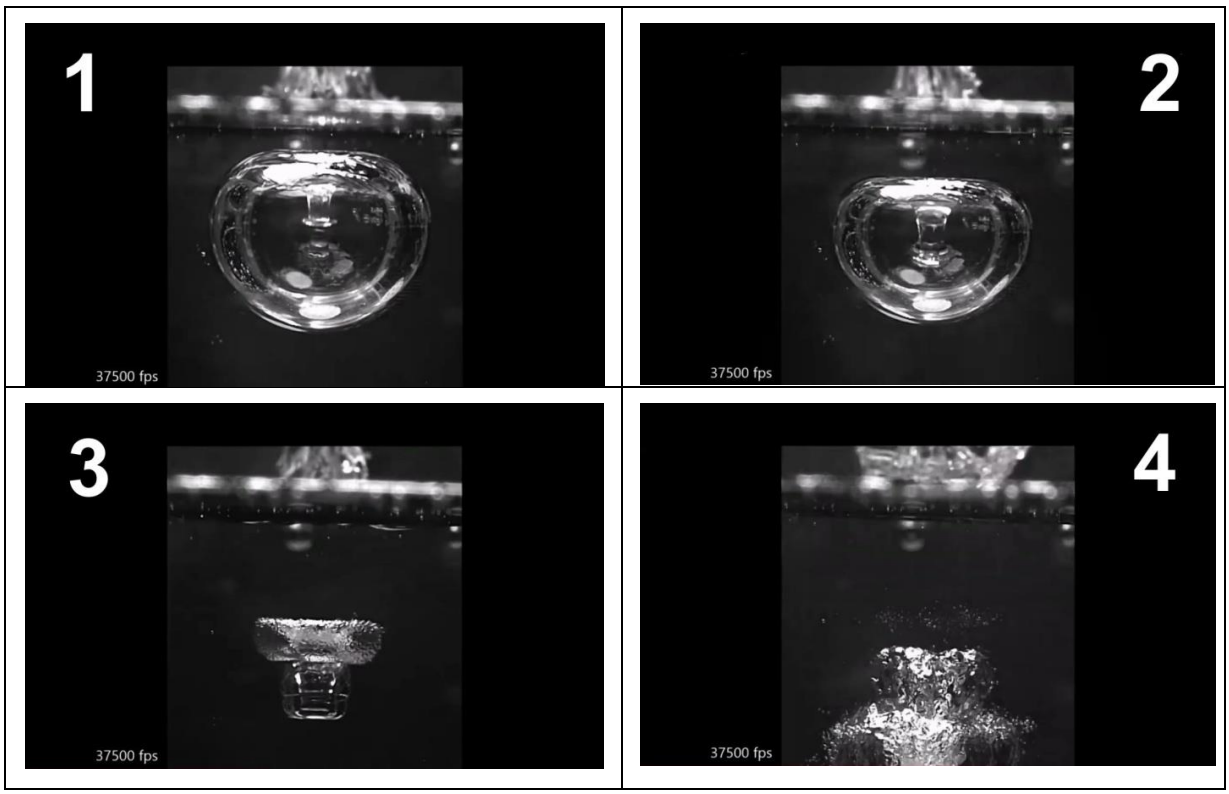


Рис. 1. Несиметричний колапс кавітаційної каверни [5]

Аналітичний опис поведінки й колапсу кавітаційної каверни дуже складний. Наприклад, приблизне рівняння динамики колапсу може бути записано так [6]:

$$\left(1-\frac{1}{c}\frac{dR}{dt}\right)R\frac{d^2R}{dt^2}+\frac{3}{2}\left(1-\frac{1}{3c}\frac{dR}{dt}\right)\left(\frac{dR}{dt}\right)^2 = \left(1+\frac{1}{c}\frac{dR}{dt}\right)\frac{1}{\rho_L}\left[p_B-p_\infty-p_c(t+R/c)\right]+\frac{R}{\rho_L c}\frac{dp_B}{dt} \quad (1)$$

У рівнянні (1): R – радіус каверни, c – швидкість звуку в рідині (воді), t – час, ρ_L – густина рідини (води), p_B – тиск від зовнішних сил, p_∞– тиск рідини (води) на нескінченності, $p_c(t)$ – змінна частина тиску рідини (води) у місці розташування центра каверни (за відсутності каверни).

Розрахунки [6] вказують, що імпульс тиску p_P в рідині (воді) пов'язаний з максимальним радіусом R_M кавітаційної каверни, тиском рідини (води) p_∞ на нескінченності та відстанню r від центра каверни, згідно з рівнянням (2):

$$p_P \approx 100 R_M p_\infty / r \quad (2)$$

Тобто імпульс тиску демонструє зменшення приблизно як r^{-1} у процесі його розповсюдження від кавітаційної каверни на відстань r. Наприклад, якщо p_∞ дорівнює 10^5 Па, то на відстані максимального радіуса каверни (при $r = R_M$) імпульс тиску досягає 10^7 Па. Це також відповідає експериментальним даним [6].

Рівняння (3) відповідає дінаміці кавітаційної каверни за умови домінування теплових ефектів [6]:

$$R = R_o - \frac{p_c R_o^2}{\Sigma}\left[\frac{4\pi^{1/2}}{\int_0^1 \frac{dy}{(y(1-y))^{1/2}}}\right] t^{1/2} \quad (3)$$

У рівнянні (3) член у квадратних дужках є константою, яка приблизно дорівнює одиниці, Σ – параметр теплового пограничного шару [6].

Швидкість кумулятивного мікроструменя U_J у момент удару в протилежну стінку кавітаційної каверни пов'язана рівнянням (4) з такими параметрами: ρ_L – густина рідини (води), Δр – різниця між тиском (на нескінченності) при максимальному радіусі каверни і при колапсі [6]:

$$U_J = \xi(\Delta p/\rho_L)^{1/2} \quad (4)$$

При цьому ξ – константа, яка відповідає діапазону від 7,6 до 11, і навіть до 64 в окремих випадках [6].

Повернемося до практичних питань.

Деякі дослідники вважають, що найперспективнішими пристроями для генерації кавітації та кавітаційної обробки стічних вод є роторно-імпульсні апарати. У таких апаратах генерується гідродинамічна кавітація поблизу лопатей або елементів, які обертаються в рідині (воді). Експериментально встановлено, що кавітаційна обробка стічних вод у роторно-імпульсному апарат, з додаванням 0,1%-го розчину гіпохлориту натрія дає задовільні результати. Кавітаційна обробка дозволяє знизити в кілька разів потребу в хімічних реагентах для очищення, що позитивно впливає на склад води, яка повертається в навколишне середовище [7].

Але, на нашу думку, проблема не тільки в ефективності очищення, а й у вартості такої технології з огляду на руйнівну дію кавітації на самі кавітаційні апарати. Необхідно розробити таку конструкцію кавітаційного апарату, в якому руйнівна дія кавітації на сам апарат була б мінімальною. Тому автори планують проводити дослідження на двох пристроях: роторно-імпульсному апараті й гідродинамічному апараті нової конструкції, де хмара кавітаційних каверн не торкається стінок апарату й не руйнує їх (рис. 2).

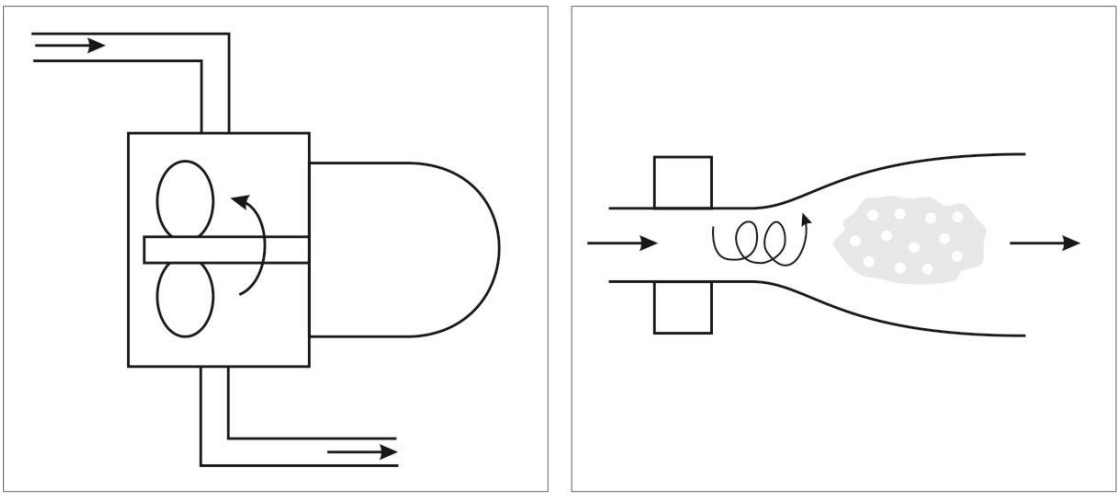


Рис. 2. Роторно-імпульсний апарат (ліворуч) і гідродинамічний апарат нової конструкції (праворуч)

Також автори планують досліджувати спільну дію кавітаційної обробки стічних вод з додаванням деяких хімічних реагентів, маючи на меті зменшити використання реагентів.

ПОСИЛАННЯ

1. Meredith Garofalo. NASA satellites reveal Earth's continents are getting drier (November 25, 2024). URL: https://www.space.com/the-universe/earth/nasa-satellites-reveal-earths-continents-are-getting-drier (дата звернення: 28.02.2025).
2. Rodell, M., Barnoud, A., Robertson, F.R. *et al.* An Abrupt Decline in Global Terrestrial Water Storage and Its Relationship with Sea Level Change. *Surv Geophys* 45, 1875–1902 (2024). https://doi.org/10.1007/s10712-024-09860-w.
3. Вашкурак У. Ю., Шевчук Л. Кавітаційне очищення стічних вод жиркомбінату від органічних забруднень у присутності газів різної природи. CTAS, 2018. Вип. 1, № 1. С. 105–110. https://doi.org/10.23939/ctas2018.01.105.
4. Кавитация. Физический энциклопедический словарь. М, 1984. С. 236–237.
5. Cavitation in slow motion (37,500 fps). URL: https://youtube.com/watch?v=CKakEG6X82M&feature=shared (дата звернення: 28.02.2025).
6. Christopher E. Brennen. Cavitation and Bubble Dynamics. https://doi.org/10.1017/CBO9781107338760.
7. Obodovych O. M., Sydorenko V. V., Tselen B. Y., Stepanova O. E. Wastewater treatment using cavitation effects. Chapter 2. Innovation in modern science, 2023. https://doi.org/10.30890/2709-2313.2023-20-02-014.

УДК 621.1:681.5

АЛГОРИТМ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОВЕДЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТВЕРДОПАЛИВНОГО КОТЛА

О. М. Суржик

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна
e-mail: asurzhyk@ukr.net

Розроблено алгоритм розрахунку оптимального часу проведення технічного обслуговування твердопаливного котла, зважаючи на співвідношення витрат, що виникають через відхилення від номінального режиму роботи котла внаслідок забруднення його конструктивних елементів, та витрат на проведення технічного обслуговування котла.

Ключові слова: *твердопаливні котли, технічне обслуговування котла, теплообмін, енергоефективність котла, тепловий баланс.*

ALGORITHM FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF SOLID FUEL BOILER MAINTENANCE

O. Surzhyk

Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine
Metrolohichna str. 50, Kyiv, 03143, Ukraine
e-mail: asurzhyk@ukr.net

An algorithm has been developed for calculating the optimal time for performing technical maintenance of a solid fuel boiler, based on the ratio of costs arising from deviations from the nominal operating mode of the boiler due to contamination of its structural elements, and the costs of performing technical maintenance of the boiler.

Key words: *solid fuel boilers, boiler maintenance, heat exchange, boiler energy efficiency, heat balance.*

ORCID: 0000-0002-7403-8584

Твердопаливні котли потребують ретельного та систематичного технічного обслуговування. Це пов'язано з тим, що тверді види палива мають більшу зольність та сажоутворення порівняно з газоподібними або рідкими видами палива. Відповідно, використання твердого палива у котлі призводить до значного утворення золи та відкладення сажі, що забруднює функціональні елементи й теплопередавальні поверхні котла. Втрати енергоефективності твердопаливного котла (далі – енергетичні втрати) пов'язані з такими факторами: втрати через неповне згоряння палива та з газоподібними продуктами згоряння виникають внаслідок забивання колосника і ємностей для видалення золи та порушення оптимальних умов згоряння палива, а саме через зменшення первинної та вторинної подачі повітря, зменшення тяги через значне відкладання сажі на конструктивних елементах котлової установки, зокрема в димоході та димососі котла; втрати через відкладення накипу солей жорсткості на теплопередавальних поверхнях котла з боку теплоносія; втрати через відкладання сажі від продуктів згорання на поверхнях котла, що призводить до підвищення коефіцієнта тепловіддачі від продуктів згоряння до теплопередавальних поверхонь котла [1, 2]. Це викликає зменшення енергоефективності передачі теплоти від продуктів згоряння палива до теплоносія. Останнє своєю чергою призводить до підвищених витрат палива та зменшення екологічної безпеки [3]. У роботі запропоновано алгоритм оцінки втрати коефіцієнта корисної дії (ККД) твердопаливного котла та розглянуто шляхи підвищення ефективності роботи котла завдяки своєчасному оповіщенню про необхідність проведення його технічного обслуговування. Акцент у роботі зроблено на підвищенні ефективності проведення технічного обслуговування побутових твердопаливних котлів без необхідності значних інвестицій в удосконалення їхньої роботи завдяки програмованому логічному контролеру (ПЛК), що встановлений у котлі.

Методика оцінки додаткової витрати палива, пов'язаної з енергетичними втратами (далі – додаткова витрата палива) ґрунтується на порівнянні фактичної щільність теплопередачі з урахуванням енергетичних втрат $Q_{факт}$ і ідеальної щільності теплопередачі за відсутності втрат $Q_{ідеал}$. Для оцінки щільності теплопередачі використовується рівняння теплового балансу: щільність теплопередачі, яку котел передає теплоносію, визначається за формулою: $Q=G\cdot C_p\cdot(T_{вих}-T_{вх})$, де Q — щільність теплопередачі (Вт), G — масова витрата теплоносія, вимірюється витратоміром

(кг/с), $C_р$ — питома теплоємність теплоносія (для води приймаємо $C_р = 4190$ Дж/(кг·°С)), $T_{вих}$, $T_{вх}$ — температура теплоносія на вході в котел та на виході з нього вимірюються температурними датчиками (°С). Витрата палива для створення щільності теплого потоку Q визначається через формулу теплотворної здатності палива: $Q=B \cdot Q_п \cdot \eta_{зг}$, де B — витрата палива в одиницю часу (кг/с), $Q_п$ — теплотворна здатність палива, закладається в алгоритм розрахунку залежно від вибраного виду палива (Дж/кг), $\eta_{зг}$ — ККД процесу згоряння (ККД процесу згоряння твердого палива становить приблизно 85—90 % для сучасних котлів і 70—80 % для традиційних моделей [4], середнє значення $\eta_{зг}$ задається виробником котла та закладається в алгоритм розрахунку). Через порівняння ідеальної та фактичної щільності теплопередачі визначається додаткова витрата палива: $\Delta B=(Q_{ідеал}-Q_{факт})/(Q_п \cdot \eta_{зг})$. Всі змінні параметри надсилаються вимірювальними приладами в ПЛК котла.

На основі наведених вище формул розроблено алгоритм розрахунку додаткової витрати палива в одиницю часу, а також алгоритм порівняння додаткової витрати палива за період часу з останнього технічного обслуговування в грошовому вимірюванні з витратами на проведення власне технічного обслуговування котла. Оператору (власнику або зацікавленій особі) котлової установку достатньо вибрати вид палива, що використовується, ввести у вхідні дані ПЛК котла значення поточної ціни одиниці палива (грн/кг) та значення витрат на проведення технічного обслуговування котла у грошовому вимірі (грн). При досягненні умови, що додаткові витрати палива за період часу з останнього технічного обслуговування в грошовому вимірюванні дорівнюють або перевищують витрати на проведення технічного обслуговування котла, оператору котла надсилається повідомлення про необхідність негайного проведення технічного обслуговування котла. Така схема діагностики та попередження про необхідність проведення технічного обслуговування котла добре зарекомендувала себе в побутовому твердопаливному котлі. При використанні бака-акумулятора теплової енергії, що є особливо важливим при експлуатації твердопаливного котла, та сонячних колекторів як дешевого низькопотенційного джерела теплової енергії проведення позапланового технічного обслуговування котла навіть у зимовий період пройшло без втрати комфорту споживачів теплової енергії та дозволило уникнути додаткових витрат палива. Реалізація запропонованого алгоритму дозволяє забезпечити ефективну роботу котла, уникнути зайвих економічних витрат, оптимізувати технічне обслуговування та підвищити ефективність роботи твердопаливних котлів.

ПОСИЛАННЯ

1. Димченко О. В. Енергоефективність твердопаливних котлів: Монографія. Київ: НТУУ "КПІ", 2020.
2. Kreith, F., Bohn M. S. Principles of Heat Transfer. 6th ed. Boston: PWS Publishing. 2001. pp. 50–80.
3. Ковальчук В. М. Теплотехніка та теплоенергетика. Харків: Видавництво "Освіта", 2019.
4. ISO 13579-3:2013. Industrial furnaces and associated processing equipment – Method for calculating energy efficiency.
5. Європейська директива 2018/2001 щодо сприяння використанню енергії з відновлюваних джерел.

УДК 620.92:621.311.29

ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСТКИ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ, ЯКІ ВИКЛИКАНІ ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

В. М. Лисий

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна
тел. +380677056138; +380951833840
e-mail: 2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com

У роботі представлено метод оцінювання частки електроспоживання конкретного споживача, яка забезпечується відновлювальними джерелами енергії (ВДЕ). Розроблені метод, алгоритм і програма визначення складової втрат потужності та електроенергії від ВДЕ у сумарних втратах електричних мереж. В основу методу покладено математичну модель електричної мережі для визначення втрат, в якій використовуються коефіцієнти розподілу струмів у вітках схеми від вузлів з ВДЕ та вузлові напруги.

Ключові слова: *фотоелектричні станції, низьковуглецеві джерела енергії, розподільчі електричні мережі, втрати потужності.*

DETERMINATION OF THE PART OF ELECTRICITY LOSSES IN ELECTRICITY NETWORKS CAUSED BY RENEWABLE ENERGY SOURCES

V. Lysyi

Institute for Renewable Energy at NAS of Ukraine
St. 20A Hnata Hotkevicha Street, Kyiv, 02094, Ukraine
phone:+380677056138; +380951833840
e-mail: lezhpd@gmail.com; 2e.14b.vlad.lysyi@gmail.com

The paper presents a method for estimating the share of electricity consumption of a particular consumer provided by renewable energy sources (RES). A method, algorithm, and program have been developed to determine the component of power and electricity losses from RES in the total losses of electrical networks. The method is based on a mathematical model of the electrical network for determining losses, which uses current distribution coefficients in the branches of the circuit from nodes with RES and node voltages.

Keywords: *photovoltaic stations, low-carbon energy sources, distribution networks, power losses*

ORCID 0009-0007-0211-9100

Низьковуглецеві відновлювані джерела енергії (НВДЕ) становлять зростаючу частку виробництва енергії в світі. Очікується, що низьковуглецеві джерела енергії стануть найбільшими джерелами відновлюваної енергії до 2025 року, 60 %. Тому енергоефективність таких джерел стає головною проблемою в сценарії, де більшість власників джерел альтернативної енергії працюють за затвердженими графіками генерації та піддаються обмеженням у випадку відхилення їх від встановлених меж.

Проблема полягає в тому, що втрати в електричних мережах нелінійно залежать від навантаження й генерування у вузлах схеми. Підключення до системи великої кількості нових розподілених джерел, зокрема вітрових електростанцій, значно збільшує потребу в додаткових системних послугах. До таких послуг можна віднести визначення втрат потужності від перетоків потужності, спричинених новими джерелами «зеленої» генерації. Ці втрати необхідно враховувати під час прогнозування та визначення походження електроенергії, від яких джерел живляться споживачі [1, 2].

Сумарні втрати потужності у вітках електричної мережі визначаються таким чином [3]:

$$\Delta\dot{\mathbf{S}}_{\text{в}} = \dot{\mathbf{V}} \cdot \dot{\mathbf{S}}_{\Sigma}, \tag{1}$$

де $\dot{\mathbf{V}}$ – матриця коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми в залежності від потужності у вузлах схеми.

Складові втрат потужності у заданій *i*-й вітці (вітках) електричної мережі від протікання в ній електроенергії ФЕС і навантаження споживачів визначається таким чином:

$$\Delta\dot{\mathrm{S}}_{\text{в}i} = \dot{\mathbf{V}}_i \dot{\mathbf{S}}_{\Sigma} = \sum_{i \in \boldsymbol{\theta}_{ВДЕ}} \dot{v}_i \dot{s}_i + \sum_{i \in \boldsymbol{\theta}_{H}} \dot{v}_i \dot{s}_i \tag{2}$$

де $\dot{\mathbf{V}}_i$ – вектор-рядок матриці розподілу втрат $\dot{\mathbf{V}}$ з уточненням напруги у вузлах відповідно до значень потужності у цих же вузлах мережі; $\dot{v}_i$ – елементи вектора-рядка $\dot{\mathbf{V}}_i$; $\dot{s}_i$ – елементи вектора потужності вузлів $\dot{\mathbf{S}}_\Sigma$; $\boldsymbol{\theta}_{ВДЕ}$ і $\boldsymbol{\theta}_H$ – масиви вузлів відповідно ФЕС і навантажень споживачів.

Зауважимо, що коефіцієнти розподілу втрат залежать від параметрів схеми, які за певних допущень вважаються постійними, а також від значень напруги у вузлах, які обумовлені навантаженням і генеруванням у вузлах схеми. Таким чином, нелінійність залежності втрат від параметрів режиму зберігається. Визначення коефіцієнтів матриці $\dot{\mathbf{V}}$ через поточні значення вузлових напруг по суті означає перехід до лініаризованої моделі нормального режиму електричної мережі при зафіксованих потужностях та напругах у вузлах.

Урахування втрат електроенергії від перетоків потужності ФЕС дозволяє більш точно прогнозувати генерування ФЕС під час балансування режимів ЕЕС, що в результаті забезпечує зменшення штрафних санкцій. Також визначення втрат потужності та електроенергії в електричних мережах та окремих її вітках, які викликані окремими (НВДЕ) та їх групами, дає можливість оцінювати і враховувати вплив НВДЕ на баланс електроенергії. В основу методу покладено математичну модель електричної мережі для визначення втрат, в якій використовуються коефіцієнти розподілу струмів у вітках схеми від вузлів та поточні значення напруг вузлів схеми, що дозволяє отримати матрицю коефіцієнтів розподілу втрат потужності у вітках схеми в залежності від потужності ВДЕ у вузлах. Значення втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних ВДЕ, можуть використовуватися під час оперативного планування балансу.

На рис. 1 наведено графіки втрат потужності в мережі: червона крива – втрати потужності в мережі, коли ФЕС відключена; синя крива – втрати потужності в мережі, коли ФЕС генерує електроенергію, зелена крива – втрати електроенергії в мережі, які викликані в ній генеруванням ФЕС.

Ефект впливу НВДЕ на втрати електроенергії в мережі залежить не тільки від її генерування, але також і від навантаження споживачів. Наприклад, якщо о 13:00 генерування ФЕС залишиться, а навантаження зменшиться на 50 МВт, то сумарні втрати потужності в мережі становитимуть 7,34 МВт. Тобто завдяки ФЕС втрати в мережі, обчислені за (1), збільшаться з –9,59 МВт до –0,7,34 МВт, а втрати від ФЕС становлять +2,18 МВт.

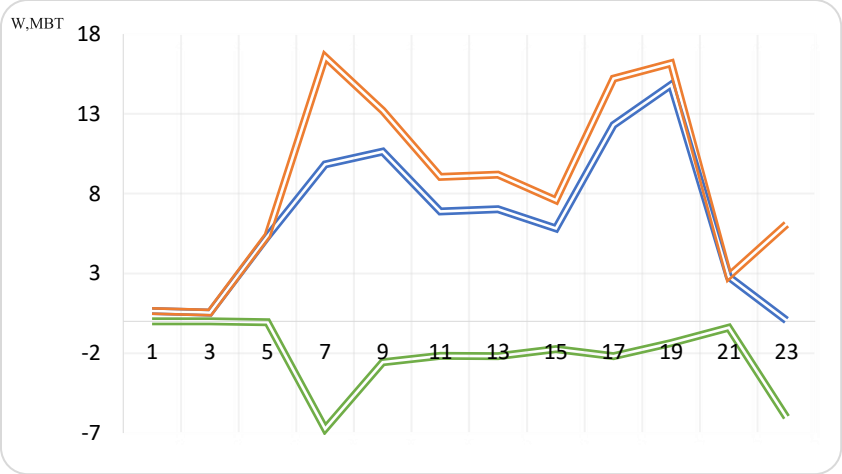


Рис. 1. Залежності втрат електроенергії в електричній мережі

Завдяки роботі ФЕС втрати електроенергії в мережі зменшилися на 2,18 МВт порівняно з тим, коли за того ж навантаження споживачів ФЕС не працювала. Застосування методів визначення втрат в електричних мережах та окремих її вітках, які викликані окремими НВДЕ та їх групами, дає можливість в реальному часі оцінювати і враховувати вплив частки НВДЕ на баланс електроенергії в ЕЕС. Значення втрат електроенергії в електричних мережах, викликаних ВДЕ, можуть використовуватися під час оперативного планування балансу електроенергії в ЕЕС, та оскільки вони є адресними, то відповідно може компенсуватися їх вартість.

ПОСИЛАННЯ

1. Лежнюк П. Д., Ковальчук О. А., Нікіторович О. В., Кулик В. В. Відновлювані джерела в розподільних електричних мережах: Монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 204 с.
2. Petr Lezhniuk, Vyacheslav Komar, Olena Rubanenko, Natalia Ostra. The sensitivity of the process of optimal decisions making in electrical networks with renewable energy sources. Przeglad Elektrotechniczny, Vol. 2020, № 10, page 32–38. DOI: 10.15199/48.2020.10.05.

УДК 669.187.2.001.7

ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИЛУЧЕННЯ ЗАЛИШКОВОГО НЕДОПАЛЕНОГО ВУГЛЕЦЮ З ЗОЛИ-ВИНЕСЕННЯ ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

В. П. Гончар[1], О. Б. Сезоненко[2], О. В. Назаренко[3], А. В. Ялтишев

The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, tel +380444555903 e-mail: alsez@ukr.net

У цій роботі виконано порівняльний та якісний практичний аналіз основних технологій вилучення незгорілих вуглецевих залишків із золошлаку ТЕС для подальшого використання їх як висококалорійного додаткового чи замінного палива на електростанціях або як окремий кондиційний товарний продукт. Розглянуто доцільність використання таблиць концентрацій для гравітаційної класифікації порівняно з флотаційною сепарацією. Надано рекомендації щодо використання мінеральних залишків або хвостів очищення як мінерального наповнювача будівельних матеріалів, що відповідають вимогам нормативної документації.

Ключові слова: *вуглець, сепарація, концентрація, флотація, зола-винесення*

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY FOR EXTRACTION OF RESIDUAL UNBURNED COAL FROM ASH DISPOSAL OF THERMAL POWER PLANTS

V. Gonchar[1], O. Sezonenko[2], O. Nazarenko[3], A. Yaltyshev

The Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
39, Degtyarivska Str., 03113 Kyiv, Ukraine, tel +380444555903 e-mail: alsez@ukr.net

ORCID: [1]0000-0001-9938-2421, [2]0000-0001-6386-2044, [3]0000-0002-0226-0805

In this work, a comparative and qualitative practical analysis of the main technologies for the extraction of unburnt carbon residues from the ash-flow of thermal power plants for further use as a high-calorie additional or replacement fuel at the power plants or as a separate conditioned commodity product is performed. The expediency of using concentration tables for gravity classification in comparison with flotation separation is considered. Recommendations are provided on the use of mineral residue or cleaning tailings as a mineral filler for building materials that meet the requirements of regulatory documentation.

Key words: *carbon, separation, concentration, flotation, ash removal*

Згідно з результатами раніше виконаних досліджень [1], одним із трьох основних складових компонентів відходів вугільних ТЕС є недопалений вуглець. Частки такого вуглецю в золі вугільних ТЕС є залишками вихідного вугільного палива, які не згоріли в топках котлів ТЕС через технологічні ускладнення (швидкий вихід з високотемпературної зони, перебування в зоні факела, що збіднена киснем тощо) [2, 3]. Сучасні ТЕС живляться пиловугільним паливом, підготовка якого передбачає помел вугілля до часток дрібніших за 200…500 мкм, отже, залишки вугілля не можуть перевищувати розмірами частки вихідного палива.

Видобуток недопаленого вугілля із золошлаків становить найбільший інтерес з погляду переробки відвалів вугільних ТЕС. Це спричинене кількома суттєвими факторами:

- Це вугілля фактично вже добуте, перероблене та доставлене з місця видобутку до споживача. Отже, ці витрати будуть виключені з собівартості отриманого продукту.
- Вміст недопаленого вугілля у відвальних золошлаках є вельми значним. Цей показник для ТЕС, що працювали або працюють на антрацитах, зазвичай є вищим за 10 %, в деяких випадках сягаючи 35…40 %, а в середньому складаючи 15…25 % [2, 4]. Загальний об'єм золовідвалів може сягати 30…50 млн т на одну ТЕС [5…7], що є еквівалентом 6…12 млн т депонованого вуглецю.
- У процесі термічного впливу, якого зазнали частки вугілля у факелі пальника, відбувається видалення з вугілля летких сполук, зокрема сполук сірки, миш'яку, ртуті. Отже залишкове вугілля міститиме менше домішок, що забруднюють довкілля, ніж вихідне [8].

- При видобутку вуглецю з золи ТЕС ми фактично отримуємо два продукти: власне вуглець та золу, очищену від вуглецю до вмісту останнього нижче 5 %. Це дозволяє використовувати таку золу як компонент бетонів та розчинів, на відміну від вихідної золи з підвищеним вмістом вуглецю, взаємодія якого з цементом у процесі тверднення спричиняє погіршення властивостей бетону [9…11]

Проте залишкове вугілля з золошлаків ТЕС є вельми специфічною сировиною. Особливості його властивостей ускладнюють як процес вилучення з золи, так і подальше споживання. Дуже велику частину недопаленого вугілля становлять гібридні (композитні) зерна, представлені зростком мінерального залишку згорілої частини у вигляді алюмосилікатного скла з незгорілою вугільною часткою. Іноді трапляються частки вугілля, поверхня яких повністю глазурована алюмосилікатним склом [8]. Ці частинки важко піддаються сепарації класичними методами. Гравітаційна сепарація не дозволяє розділяти частки, густина яких не має чіткої межі, натомість має місце монотонна зміна цього показника від значень, притаманних вугіллю, до густини алюмосилікатного скла. Флотація ускладнена наявністю на поверхні зерен вуглецю частково окисненого шару, який завдяки присутності в ньому груп C-OH, C=O, C-OOH є певною мірою гідрофільним.

Аналіз особливостей та недоліків різних методів сепарації, що застосовуються при збагаченні корисних копалин та в суміжних галузях [9…11], спонукав до вибору флотації, за сукупністю переваг, якості найперспективнішого методу розділення золошлакових сумішей для проведення подальших досліджень. Як метод порівняння було вибрано гравітаційну класифікацію за допомогою концентраційного столу.

Гравітаційна класифікація

Сепарація мінеральних сумішей на класифікаційному столі відбувається за рахунок одночасної дії потоку води, що стікає по деці столу завдяки нахилу, та зворотно-поступального руху деки в напрямку, перпендикулярному потоку води. Результатом дії вищенаведених факторів є розподіл компонентів суміші по деці за густиною та розміром.

При випробуваннях золи Трипільської ТЕС було застосовано двостадійний процес. На першій стадії були виокремлені максимально важкі та великі частки (фракції «1-важка фр.» та «1-середня фр.»). Легка фракція першої стадії сепарації («1-хвости») була піддана повторній сепарації з коригуванням налаштувань концентраційного столу (кута поперечного нахилу деки в діапазоні 2–8^{o}, частоти коливань від 300 до 500 хв$^{-1}$ і величини ходу деки від 4 до 10 мм) для підвищення ефективності розділення. Внаслідок повторної сепарації знов були виокремлені важка та середня фракції («2-важка фр.» та «2-середня фр.»), а легка фракція була додатково розділена на дві («2-хвости-1» та «2-хвости-2»).

У тестах золи Ладижинської ТЕС була використана конструкційна властивість лабораторного концентраційного столу: можливість виокремлювати бажані сегменти з широкого «віяла» продуктів сепарації. Тому цей дослід проводили за один цикл, проте збирали та аналізували ширшу, ніж в попередніх дослідах з золою Дарницької ТЕС, номенклатуру фракцій сепарації, а саме одну важку фракцію, три середні («середня фр – 1», «середня фр – 2», «середня фр – 3») та дві легкі («хвости-1» та «хвости-2»).

Отримані фракції були висушені при 125…150 ^{o}C, зважені та проаналізовані на вміст недопаленого вуглецю. Результати аналізу фракцій золошлакових сумішей з Дарницької та Ладижинської ТЕС, отриманих сепарацією на концентраційному столі, наведено, відповідно, в табл. 1–3.

Таблиця 1. Результати сепарації на концентраційному столі золи Трипільської ТЕС; перший цикл сепарації

Показник	Вихідна зола	1-важка фр.	1-середня фр.	1-хвости
Вміст вуглецю, %	16.6	4.7	12.1	32.1
Маса фракції, г	805.5	6.9	54.7	716.4

Таблиця 2. Результати сепарації на концентраційному столі золи Трипільської ТЕС; повторна сепарація хвостів

Показник	2-важка фр.	2- середня фр.	2-хвости-1	2-хвости-2
Вміст вуглецю, %	0.0	18.1	6.3	37.3
Маса фракції, г	9.0	129.9	206.9	408.7

Таблиця 3. Результати сепарації на концентраційному столі золи Ладижинської ТЕС

Показник	Вихідна зола	Важка фракція	Середня фр. - 1	Середня фр. - 2	Середня фр. - 3	Хвости-1	Хвости-2
Вміст вуглецю, %	2.8	0.1	1.3	2.2	3.6	12.0	7.4
Маса фракції, г	2550.3	149.5	688.1	937.7	676.2	77.5	2.2

Аналіз наведених вище даних дозволяє зробити такі висновки:

1. Розділення золи вугільних ТЕС з використанням концентраційного столу дає змогу досить ефективно виокремлювати важку фракцію золи.
2. Важка фракція характеризується низьким (0,1 мас. % для золи Ладижинської ТЕС, 4,7 мас.% для золи Трипільської ТЕС) вмістом вуглецю.
3. Переробка золи на концентраційному столі також дає змогу отримати легку (хвостову) фракцію, яка характеризується значним вмістом вуглецю порівняно з вихідною золою (7,4…12 мас. % для золи Ладижинської ТЕС, 32…37% для золи Трипільської ТЕС; див. табл. 1, 2).
4. Отриману вищеназваним методом легку фракцію вугільної золи можна розглядати як вихідний концентрат для подальшого виділення вуглецю з використанням інших методів збагачення корисних копалин, наприклад флотацією.

Флотаційна сепарація золи

Флотаційна класифікація (флотація) базується на властивості поверхні твердих частинок по-різному змочуватися полярними та неполярними рідинами. Зазвичай оксиди, силікати, алюмінати, які складають порожню породу, легше змочуються водою – їхня поверхня є гідрофільною. Натомість вуглець (графіт), метали, сульфіди краще змочуються органічними неполярними рідинами – їхня поверхня є олеофільною. Отже, при перемішуванні суміші пустої породи та вуглецю з емульсією неполярної рідини у воді частки пустої породи будуть змочені водою, а частки вуглецю – навпаки, будуть змочені неполярною рідиною.

Після висушування від усіх отриманих продуктів були відібрані зразки, які послідовно піддавали випалюванню при 350 та 900 °С. Перше випалювання дозволило оцінити вміст летких флотореагентів у кожному продукті. Друге випалювання було призначене для визначення вмісту залишкового вуглецю. Результати випробувань наведені в табл. 4.

Таблиця 4. Вміст летких та вугілля в різних продуктах флотації

Показник	№ досліду		
	1	2	3
Вміст летких, мас.%:			
• зола	0.6	0.6	0.4
• хвости перечистки	1.9	1.7	1.6
• вугілля	46.1	31.3	33.7
Вміст вуглецю, мас.%:			
• вихідна зола (фр. <0.25 мм)	16,6	16,6	16,6
• зола	1.8	1.6	1.3
• хвости перечистки	3.5	3.1	3.3
• вугілля	71.3	62.2	58.1

Висновки

1. Флотація дозволяє ефективно видаляти залишки вугілля з золи-винесення з можливістю отримання очищеної золи, що містить менше 1 % (фактично 0,6…0,8 %) вугілля.
2. Збільшення кількості колектор (від 0,6 до 1,2 %мас.) та піноутворювача (від 0,3 до 0,6 %мас.) підвищує ефективність вилучення вуглецю (знижується вміст залишкового вуглецю в «золі» та «хвостах» від 1,8 до 1,3 %мас., проте погіршує селективність процесу (збільшується кількість мінеральних часток у вугільному концентраті («зольність») від 28,7 до 41,9 %мас.
3. Отриманий при оптимальному співвідношенні колектору та піноутворюівача концентрат містить більше 70 % вуглецю та може бути використаний як висококалорійна (розрахункова теплота згоряння становить не менше 20 МДж/кг) добавка до вугільного живлення на ТЕС або як самостійне паливо.
4. Хвости перечистки золи за вмістом вуглецю відповідають вимогам EN 450-1 та можуть бути додані до неочищеної золи-винесення для подальшої реалізації в застосуваннях, де є прийнятним вміст вуглецю до 5 %.
5. Перспективним виглядає застосування двоетапної класифікації золи, коли на першому етапі з вихідної золи за допомогою концентраційного столу виокремлюють важку фракцію та частину алюмосилікатної речовини з отриманням проміжного продукту, що містить більше 30 % вуглецю. Цей промпродукт далі піддається флотації з отриманням за один цикл кондиційного вуглецевого концентрату. При використанні такої схеми відбудеться зменшення витрат колектору та піноутворювача, що зрештою знизить собівартість отриманого вуглецевого концентрату.

ПОСИЛАННЯ

1. Алексєєнко В., Гончар В., Гончар А., Назаренко О., Проценко І., Сезоненко О., & Ялтишев А. (2023). Потенціал використання золошлаків вугільних теплових електростанцій для виробництва альтернативних видів палива (на прикладі золошлаку ладижинської ТЕС). Енерготехнології та ресурсозбереження, 77(4), 31–42.
2. Bartoňová, Lucie. (2015). Unburned carbon from coal combustion ash: An overview. Fuel Processing Technology. 134. 10.1016/j.fuproc.2015.01.028.
3. L. Junfu et al. "Unburned carbon loss in fly ash of CFB boilers burning hard coal," in Tsinghua Science and Technology, vol. 8, no. 6, pp. 687–691, Dec. 2003.
4. Хімічні основи та екологічні проблеми використання вторинного ресурсу - зольних відходів ТЕС / П. О. Єгоров, О. Б. Нетяга, С. М. Лисицька, А. В. Тарасова. Форум гірників. 2015: матеріали міжнар. конф., 30 вересня – 3 жовтня 2015 р. Дніпропетровськ: НГУ, 2015. Т. 3. С. 199–204.
5. В. Р. Сердюк, Д. Г. Рудченко, Д. В. Гудзь. «Використання золи виносу бурштинської ТЕС в технології виробництва автоклавного газобетону». Вісник ВПІ, вип. 2, с. 24–31, Квіт. 2021.
6. Екологічна безпека та природоохоронні заходи на Ладижинський ТЕС / І. К. Олійніченко; Вінницький національний технічний університет; Інститут екологічної безпеки та моніторингу довкілля; Кафедра екології та екологічної безпеки. Електронний ресурс: URL: http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/12195.
7. Особливості впливу золовідвалів підприємств теплоенергетики на навколишнє середовище / А. В. Яцишин, І. В. Матвєєва, В. О. Ковач, В. О. Артемчук, І. П. Каменева. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2018. Вип. 28(2). С. 57–68.
8. Hower, James & Groppo, John & Graham, Uschi & Ward, Colin & Kostova, Irena & Maroto-Valer, Mercedes & Dai, Shifeng. (2017). Coal-derived unburned carbons in fly ash: A review. International Journal of Coal Geology. 179. 10.1016/j.coal.2017.05.007.
9. Yaowen Xing, Fangyu Guo, Mengdi Xu, Xiahui Gui, Haisheng Li, Guosheng Li, Yangchao Xia, Haisheng Han, Separation of unburned carbon from coal fly ash: A review, Powder Technology, Volume 353, 2019, Pages 372-384, ISSN 0032-5910, https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.05.037.
10. Bo Lv, Feishuo Jiao, Zengqiang Chen, Bobing Dong, Chaojun Fang, Chuanxiang Zhang, Xiaowei Deng, Separation of unburned carbon from coal fly ash: Pre-classification in liquid–solid fluidized beds and subsequent flotation, Process Safety and Environmental Protection, Volume 165, 2022, Pages 408–419, ISSN 0957-5820, https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.07.031.
11. Cao, Y. J., Li, G. S., Liu, J. T., Zhang, H. J., & Zhai, X. (2012). Removal of unburned carbon from fly ash using a cyclonic-static microbubble flotation column. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 112(10), 891–896. Retrieved October 27, 2024, from http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532012001000010&lng=en&tlng=en.

УДК 621.311.25

УДК 621

ІННОВАЦІЙНІ ТЕРМОІЗОЛЯЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ РІШЕНЬ ПРИ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ БУДІВЕЛЬ

А. С. Данішевський

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна
тел. 0671556711, e-mail:dan1sh@i.ua

У роботі проведено системний аналіз досліджень, присвячених інноваційним термоізоляційним матеріалам. Розглянуті характеристики таких матеріалів, як аерогелі, вакуумні панелі, матеріали на основі поліуретану та фазозмінні матеріали. Метою статті є огляд сучасних тенденцій у галузі термоізоляції та визначення перспектив їх розвитку.

Ключові слова: *енергоефективність, теплоізоляція, аерогель, вакуумні панелі, фазозмінні матеріали.*

INNOVATIVE THERMAL INSULATION MATERIALS FOR ENERGY-EFFICIENT SOLUTIONS FOR THERMAL MODERNISATION OF BUILDINGS

A. Danishevskyi

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine
phone: 0671556711, e-mail: dan1sh@i.ua

The study conducted a systematic analysis of research on innovative thermal insulation materials. The characteristics of such materials as aerogels, vacuum panels, polyurethane-based materials and phase change materials are considered. The purpose of the study is an overview of current trends in the field of thermal insulation and identification of perspectives for their development.

Keywords: *energy efficiency, thermal insulation, aerogel, vacuum panels, phase change materials.*

ORCID: 0000-0002-6166-0999.

Вступ. Сучасний стан проблеми

Енергоефективність будівель є одним з ключових факторів сталого розвитку та сприяння декарбонізації. Зі зростанням вимог до енергозбереження, зростанням цін на енергоносії та посиленням екологічних вимог пошук та розробка новітніх термоізоляційних матеріалів набувають особливої актуальності. Найпоширеніші ізоляційні матеріали, як-от мінеральна вата та пінополістирол, мають певні обмеження, що стимулює дослідження та впровадження інноваційних рішень у сфері будівельної теплоізоляції.

У межах дослідження виявлено понад 1000 наукових робіт за останні 5 років (2020–2025), які присвячені досліджуваним матеріалам та індексуються в наукометричних базах даних. З індексованих джерел було накопичено базу даних, що охоплює 78 документів. На наступному етапі джерела були розділені на дві групи: експериментальні дослідження та методики. Третім кроком було відокремлення даних щодо будівельної теплоізоляції. На останньому етапі були проаналізовані дослідження, що оцінюють екологічні та економічні наслідки.

Стан законодавства України у сфері енергоефективності будівель

Законодавство України у сфері енергоефективності будівель активно розвивається, зокрема в контексті європейської інтеграції та прагнення до зниження енергетичних витрат, підвищення енергоефективності та забезпечення сталого розвитку. Основними законами, що регулюють енергоефективність будівель в Україні, є «Про енергетичну ефективність будівель», «Про Фонд енергоефективності», «Про енергетичну ефективність» та інші нормативно-правові акти, спрямовані на адаптацію до вимог Європейського Союзу в межах процесу імплементації європейських стандартів енергетичної політики.

Стратегія термомодернізації будівель на період до 2050 року, стаття 151 закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [1], прийнятого у 2017 році, визначає основні принципи забезпечення енергоефективності в будівництві та експлуатації будівель. Ця стратегія містить вимоги до проєктування, будівництва, реконструкції та ремо-

нту будівель з урахуванням енергозберігаючих технологій та матеріалів. Також вона визначає вимоги до енергетичної сертифікації будівель, що дозволяє оцінити їх енергетичну ефективність і впливати на рівень енергоспоживання на всіх етапах життєвого циклу будівлі. Однією з основних цілей цього закону є зниження енергетичних витрат, зокрема в будівельному секторі, що є одним з основних споживачів енергії в Україні.

З огляду на вимоги сучасного законодавства щодо зниження енергоспоживання та підвищення енергоефективності питання застосування інноваційних термоізоляційних матеріалів стає дедалі актуальнішим. Високотехнологічні матеріали, як-от вакуумні ізоляційні панелі, аерогелі, матеріали на основі поліуретану та фазозмінні матеріали, можуть стати важливим інструментом для досягнення значного зниження енергоспоживання в будівництві. Сучасні матеріали дозволяють не лише знизити теплоємність будівель, але й скоротити витрати на обігрів або охолодження приміщень, що відповідає вимогам законодавства щодо енергетичної ефективності. Тому дослідження та впровадження інноваційних термоізоляційних матеріалів є важливим кроком у розвитку національної політики енергоефективності та відповідності міжнародним стандартам.

Вакуумні ізоляційні панелі (VIP)

Вакуумні ізоляційні панелі є одними з найбільш інноваційних матеріалів, що забезпечують високу ефективність теплоізоляції. Вони мають значно меншу товщину порівняно з традиційними матеріалами, такими як пінопласт чи мінеральна вата, при цьому зберігаючи низький рівень теплопровідності. Вакуум в середині панелей значно знижує теплопередачу, що робить ці матеріали ідеальними для обмежених просторів і сприяє забезпеченню енергозбереження.

Існує кілька типів VIP, які відрізняються за складом та застосуванням. Одним з найпоширеніших є варіант з мікропористою структурою, де матеріали на основі кремнезему чи силікагелю використовуються для утримання вакууму всередині панелі. Це забезпечує високу ефективність теплоізоляції, проте такі панелі можуть бути досить чутливими до механічних пошкоджень. Інший варіант VIP включає аерогелі, які є надлегкими матеріалами з дуже низькою теплопровідністю, що також дозволяє досягти ефективної теплоізоляції при невеликій товщині. VIP з полімерними оболонками, як-от поліуретанові або полістирольні панелі, мають вакуум, утримуваний за допомогою полімерних матеріалів.

Вакуумні панелі, що містять кремнеземні волокна, можуть бути стійкішими до високих температур і механічних пошкоджень, що робить їх оптимальними для застосувань в умовах високих температур. Останнім часом розробляються VIP на основі наноматеріалів, які поєднують властивості різних матеріалів для досягнення високих характеристик теплоізоляції. Ці панелі можуть використовуватися в специфічних сферах, таких як космічна техніка, де потрібна надзвичайно висока термічна стабільність та ефективність теплоізоляції. Всі ці різновиди VIP мають свої переваги та недоліки, проте загальна тенденція полягає в тому, що технології виготовлення таких панелей постійно вдосконалюються, що дозволяє знижувати їхню вартість і робити їх доступнішими для широкого використання в будівництві з показником коефіцієнта залежно від використовуваного матеріалу сердечника; теплопровідність у центрі панелі може бути в діапазоні 0,0035–0,008 Вт/(м · К) [2].

Аерогелі

Аерогелі є надлегкими і надзвичайно ефективними теплоізоляційними матеріалами. Вони складаються з тонких пористих структур, які заповнені газом, що практично не проводить тепло.

Аерогелі мають чудові термоізоляційні властивості (коефіцієнт теплопровідності), навіть при дуже тонкому шарі, що робить їх ідеальними для теплоізоляції в умовах, коли необхідно зберегти простір або забезпечити високі термоізоляційні характеристики при мінімальних витратах на матеріали з можливим досяжним значенням коефіцієнта 0,011 Вт/(м · К) [3].

Матеріали на основі поліуретану (PUR)

Поліуретанові ізоляційні матеріали можуть бути як у формі жорстких плит, так і у вигляді піни. Вони мають високий коефіцієнт теплоізоляції й використовуються в будівництві для утеплення дахів, стін і підлог. Однією з інновацій є використання екологічно чистих газів у процесі виробництва, що знижує їхній вплив на навколишнє середовище. Розглянуті дослідження показують, що матеріали на основі поліуретан-поліізоціанурату (PUR/PIR) характеризуються теплопровідністю λ в діапазоні 0,0254–0,0294 Вт/(м · К) [4].

Фазозмінні матеріали (PCM)

Фазозмінні матеріали мають здатність зберігати та вивільняти тепло під час зміни фаз (від твердого до рідкого, і навпаки). Це дозволяє зменшити коливання температури в приміщеннях, що значно підвищує енергоефективність будівель. Ці матеріали можуть бути інтегровані в стіни, покрівлю або підлогу будівель, щоб зберігати тепло в зимовий період і віддавати його влітку [5, 6].

Методика дослідження

Аналіз інноваційних матеріалів проводився за такими критеріями: коефіцієнт теплопровідності, життєвий цикл згідно з [7], економічний показник, порівняння з традиційними теплоізоляторами, кліматичні умови застосування, можливість застосування на різних стаціях будівництва, модернізації будівлі. Результати дослідження зведені в підсумкову таблицю. Аналітично відносні показники по досліджуваних матеріалах відображено графічно на рисунку у вигляді діаграми моделі зрілості за прийнятою п’ятибальною шкалою оцінювання.

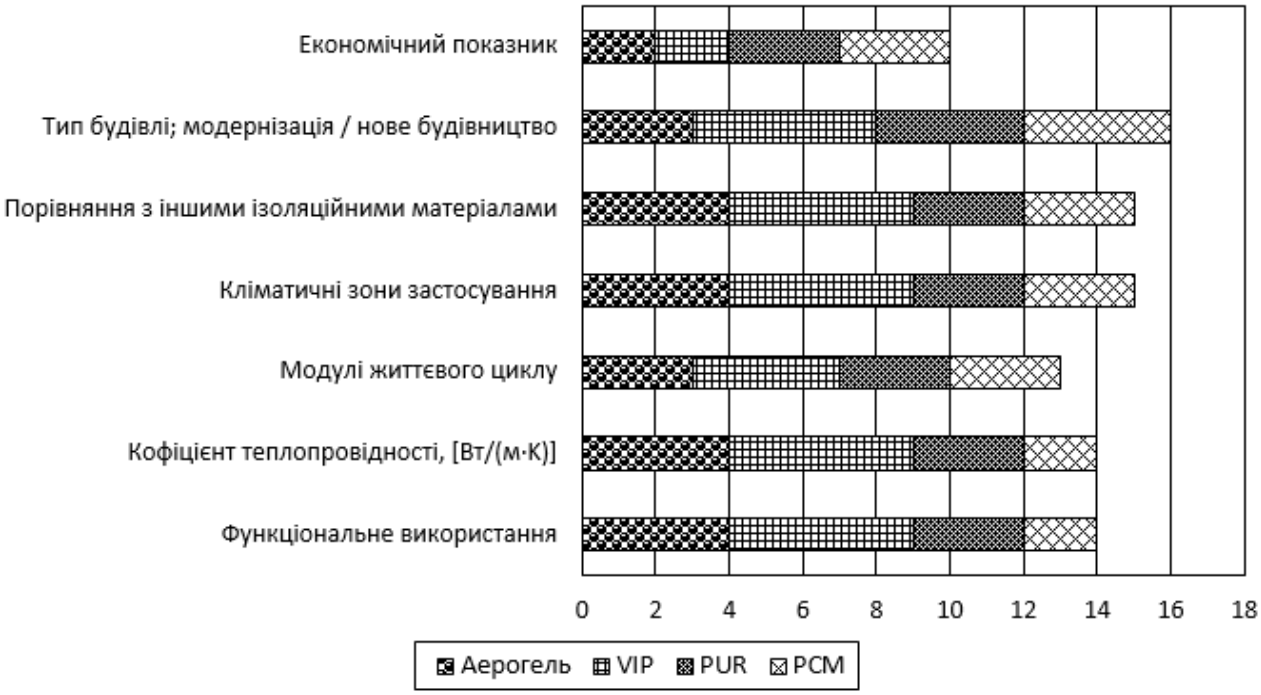


Рисунок. Модель зрілості інноваційних термоізоляційних матеріалів за відносною п’ятибальною шкалою

Перспективи

Відповідно до результатів порівняння інноваційних термоізоляційних матеріалів можна виділити такі наукові тенденції. Вакуумні ізоляційні панелі отримали найвищу оцінку 5 за функціональне використання, що свідчить про їх універсальність та високу ефективність у різних галузях, як-от будівництво, холодильна техніка й транспортування. Аерогелі отримали оцінку 4, що вказує на їх високу ефективність, хоча через високу вартість та складність виробництва вони мають обмеження в застосуванні. Матеріали на основі поліуретану та фазозмінні матеріали отримали оцінки 3, що вказує на меншу ефективність порівняно з VIP та аерогелями, особливо в таких критичних сферах, як будівництво. Всі матеріали отримали схожі оцінки (4) за модулями життєвого циклу, що свідчить про добре описані та стабільні показники їх використання, хоча VIP та аерогелі можуть потребувати додаткового аналізу для повнішого вивчення.

Щодо економічного показника, VIP і аерогелі отримали оцінку 2, що підтверджує високу вартість виготовлення та установки цих матеріалів. PUR і PCM, з оцінкою 3, є доступнішими за ціною. VIP продемонстрували найкращі результати за λ, отримавши оцінку 5, що свідчить про їх надзвичайно низьку теплопровідність, порівняно з іншими матеріалами, такими як аерогелі (оцінка 4), PUR (оцінка 3) та PCM (оцінка 3), де λ є вищим.

Порівняння з іншими ізоляційними матеріалами показує, що VIP мають найбільшу ефективність, отримавши оцінку 5 за еквівалентну теплопередачу, що також підтверджує їх високу теплоізоляційну здатність за мінімальної товщини. Аерогелі отримали оцінку 4, що вказує на високу ефективність, але з дещо меншою ефективністю теплоізоляції порівняно з VIP. PUR і PCM отримали оцінки 3, що свідчить про їх менш ефективний теплоізоляційний вплив порівняно з VIP та аерогелями. Щодо кліматичних умов, VIP і аерогелі отримали оцінки 4, що підтверджує їх здатність бути ефективними як в умовах охолодження, так і в опаленні. PUR та PCM, маючи оцінки 3, можуть бути менш ефективними в окремих кліматичних умовах з високими температурними коливаннями.

Найвищу оцінку 5 за типом будівлі отримали VIP, оскільки вони забезпечують відмінну теплоізоляцію за мінімальної товщини, що робить їх ідеальними як для нових будівель, так і для модернізації існуючих конструкцій. Аерогелі, PUR та PCM отримали оцінки 3 і 4, що свідчить про їх меншу ефективність для нових будівель або модернізації, зокрема в порівнянні з VIP.

Висновки

Відповідно до проведеного порівняння інноваційних термоізоляційних матеріалів вакуумні ізоляційні панелі (VIP) показують найкращі результати в усіх основних категоріях, таких як теплоізоляція, універсальність застосування та ефективність при мінімальній товщині. Проте їх висока вартість залишається значною перепоною для ширшого використання, і саме зниження ціни може стати ключовим фактором для їх поширення на ринку. Аерогелі також демонструють високі характеристики теплоізоляції, але їх висока ціна і складність виготовлення роблять їх менш доступними для масового використання. Матеріали на основі поліуретану (PUR) та фазозмінні матеріали (PCM) є більш економічними, але менш ефективними порівняно з VIP і аерогелями. Вони можуть бути оптимальними для використання в ситуаціях, де вартість і простота виробництва є важливішими, ніж максимальні теплоізоляційні характеристики.

Загалом, найефективніші термоізоляційні матеріали — VIP та аерогелі. Вони мають значний потенціал для подальшого розвитку, але їхнє широке застосування залежатиме від зниження вартості та удосконалення технологій виробництва.

Цей огляд є основою для подальших досліджень у сфері енергоефективних будівельних технологій, де VIP можуть мати важливе значення для зниження енергоспоживання та зменшення вуглецевого сліду.

ПОСИЛАННЯ

1. Про енергетичну ефективність будівель. Закон України від 22 червня 2017 року № 2118-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/main/2118-19#Text (дата звернення: 13.03.2025).
2. D. Bozicek, J. Peterkov, J. Zach, M. Kosir. Vacuum insulation panels: An overview of research literature with an emphasis on environmental and economic studies for building applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 189. Part A, 2024. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113849 (дата звернення: 02.03.2025).
3. Shakila Parveen Asrafali, Thirukumaran Periyasamy, Jaewoong Lee. Characteristics of Polybenzoxazine Aerogels as Thermal Insulation and Flame-Retardant Materials. Gels, 11(2). 2025. https://doi.org/10.3390/gels11020121 (дата звернення: 09.02.2025).
4. Karol Prałat, Justyna Ciemnicka, Piotr Jankowski, Ewa Wierzbicka, Arkadiusz Plis. Experimental research on the thermal properties of innovative insulation boards made of polyurethane-polyisocyanurate (PUR/PIR). Polish Journal of Chemical Technology. Vol. 25. No. 1. 2023. Pp. 40–46, https://doi:10.2478/pjct-2023-0007 (дата звернення: 06.02.2025).
5. Mehrdad Ghamari, Chan Hwang See, David Hughes, Tapas Mallick, K Srinivas Reddy, Kumar Patchigolla, Senthilarasu Sundaram. Advancing sustainable building through passive cooling with phase change materials, a comprehensive literature review. Energy & Buildings. 2024. Pp. 1–19. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114164. (дата звернення: 08.12.2024).
6. Subodh Kumar Jha, Advaith Sankar, Yue Zhou, Aritra Ghosh. Incorporation of Phase Change Materials in Buildings. Constr. Mater. 2024, 4, 676–703. https://doi.org/10.3390/constrmater4040037 (дата звернення: 17.01.2025).
7. ДСТУ EN 15978:2022 Стійкість будівельних робіт. Оцінювання екологічних характеристик будівель. Метод розрахунку (EN 15978:2011). Чинний з 31.12.2023. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022.

УДК. 000.000.00

ЗАСТОСУВАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ВІТРА І СОНЦЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОТРЕБ ГРОМАД В ЕЛЕКТРИЧНІЙ ЕНЕРГІЇ

Д. Ю. Ткаченко, О. Г. Молибог

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
03143, вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна.
тел. (050) 644-52-93, e-mail: tkachenkodyws@gmail.com

Проаналізовано один з варіантів вирішення проблеми енергетичної стійкості громади шляхом використання вітрових та сонячних електростанцій, розглянуто особливості впровадження мікромереж.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, вітроустановка, сонячна електростанція, енергетична стійкість громад, розподілена генерація, мікромережа.*

APPLICATION OF RENEWABLE WIND AND SOLAR ENERGY SOURCES TO PROVIDE COMMUNITIES' ELECTRICITY NEEDS

D. Tkachenko, O. Molybog

The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
03143, Metrolohichna str. 50, Kyiv, Ukraine.
phone: (050) 644-52-93, e-mail: tkachenkodyws@gmail.com

One of the options for solving the problem of community energy sustainability by using wind and solar power plants is analyzed, and the features of the implementation of microgrids are considered.

Key words: *renewable energy sources, wind turbine, solar power plant, community energy sustainability, distributed generation, microgrid.*

Будова енергетичної системи України зумовила нерівномірний розподіл виробництва та споживання електричної енергії на території країни. Так, найбільші потужності виробництва електричної енергії сконцентровані в південних, східних і, частково, центральних регіонах, а енергетична система забезпечує споживачів в інших регіонах, транспортуючи електроенергію на значні відстані. Забезпечення сталого режиму енергосистеми, коли об'єм виробленої електричної енергії дорівнює об'єму споживання, забезпечується балансуванням розподілу споживання та маневровими потужностями об'єктів генерації.

Збройні атаки на енергосистему спричинили значні руйнування об'єктів генерації, що зменшило потужності виробництва та обмежило можливості маневрування; пошкодження систем передачі та розподілу електричної енергії знизило спектр можливостей балансування. Всі ці обставини призводять до аварійних відключень та необхідності запровадження стабілізаційних відключень споживачів по всій території України, що має негативний вплив на суспільство та перешкоджає сталому функціонуванню та розвитку економіки.

Таким чином, створення умов для сталого розвитку національної економіки через забезпечення доступу до надійних, стійких і сучасних джерел енергії є беззаперечним пріоритетом для всіх складових енергосистеми та відповідає місії Енергетичної стратегії України. Серед заходів покращення стійкості та надійності енергозабезпечення в Енергетичній стратегії України до 2050 року, схваленій розпорядженням Кабінету міністрів № 373-р від 21 квітня 2023 року, передбачено розвиток інноваційної та децентралізованої енергосистеми, забезпечення енергетичного сектору власними ресурсами, зокрема за рахунок розвитку альтернативних джерел енергії [1].

Рішенням може бути створення мережі розподіленої генерації електроенергії. Така мережа має складатися з сотень малих електростанцій, що допоможе нашій енергосистемі диверсифікувати генерацію й убезпечити енергетичні об'єкти від масштабних пошкоджень. На сьогодні об'єктами розподіленої генерації виступає генерація, що використовує відновлювані джерела енергії (малі сонячні, вітрові, гідроелектростанції) та когенераційні установки (коли одночасно виробляється електрика і тепло, серед них, зокрема, станції, що спалюють біомасу, тверді побутові відходи та природний газ).

Задля дослідження можливостей впровадження концепцій розвитку розподіленої генерації на рівні територіальних громад Інститут відновлювальної енергетики Національної академії наук України (ІВЕ НАНУ) взаємодіє з громадами. Станом на березень 2025 року підписано меморандуми про співпрацю з шістьма громадами Київської, Вінницької, Кіровоградської та Миколаївської областей. З метою визначення оптимальних рішень зі створення систем забезпечення споживання територіальних громад енергетичними ресурсами підготовлено Опитувальний лист для збору вихідних даних та ідентифікації потенційних місцевих відновлювальних джерел енергії. Проведено аналіз можливостей використання потенціалу відновлюваних джерел енергії, розглянуто особливості впровадження мікромереж, можливості розбудови розподіленої генерації в межах територій адміністративних одиниць та її інтеграції на місцевому рівні.

Для пілотної Пірнівської громади Київської області в межах реалізації стратегії створення мережі розподіленої генерації електроенергії з метою диверсифікації генерації в енергосистемі опрацьовані рішення, що зображені на рис. 1:

- з урахуванням розташування об’єктів природно-заповідного фонду відповідно до [2] та територій Смарагдової мережі відповідно до [3] визначені потенційні земельні ділянки для встановлення об’єктів вітрової генерації сумарною потужністю до 20 МВт;
- на підставі інформації від органів місцевого самоврядування щодо земельних ділянок комунальної форми власності визначені потенційні земельні ділянки для розташування сонячних електростанцій сумарною потужністю до 40 МВт;
- визначені потенційні точки приєднання до енергетичної системи;
- використовуючи дані середньорічного виробітку електричної енергії [4], визначено очікуваний виробіток енергії об’єктами вітрової та сонячної генерації.

Рис. 1. Розташування об’єктів вітрової та сонячної генерації на території Пірнівської громади

Також розглянуті питання впровадження гібридних сонячних електростанцій у лікарнях, водоканалах та інших соціально значущих об’єктах, що дозволить забезпечити їх роботу під час аварійних відключень, підвищить загальну стійкість енергосистеми на місцевому рівні. Будівництво визначених об’єктів, з одного боку, забезпечує економію витрат комунальних підприємств на електроенергію, а з іншого – сприяє стабільному забезпеченню електроенергією локальних споживачів.

Виконаний аналіз показав, що значний об’єм електричної енергії яку споживає громада протягом року може бути забезпечений відновлюваними джерелами енергії. Питання забезпечення енергетичної стійкості громад залишається пріоритетним напрямом стратегічного планування та системної роботи в громадах і потребує особливої уваги.

ПОСИЛАННЯ

1. Енергетична стратегія України. URL: https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya-0
2. Природно-заповідний фонд України. URL: https://pzf.land.kiev.ua/pzf-obl-10.html (дата звернення: 18.10.2024).
3. Emerald Network - General Viewer. URL: https://emerald.eea.europa.eu/ (дата звернення: 18.10.2024).
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України: Видання третє, оновлене /за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с. URL: https://www.ive.org.ua/?page_id=953&lang=uk

УДК 621.311.25

ФУНДАМЕНТАЛЬНА ТЕПЛОФІЗИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ БУДІВЕЛЬ В КОНТЕКСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Б. І. Басок, Є.Т. Базєєв

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Булаховського, 2, Україна
borys.basok@gmail.com

Наведено результати застосування досягнень фундаментальної теплофізичної інженерії для підвищення енергоефективності будівель, зокрема при створенні пасивних будівель типу «нуль-енергії».

Ключові слова: *енергоефективність, пасивна будівля, відновлювані джерела енергії, фундаментальна інженерія*

FUNDAMENTAL THERMOPHYSICAL ENGINEERING OF BUILDINGS IN THE CONTEXT OF THE INFRASTRUCTURE RENEWAL OF UKRAINE

B. I. Basok, E. T. Bazeev

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2 Bulakhovskogo St., Ukraine
borys.basok@gmail.com

The results of the application of the achievements of fundamental thermal engineering to increase the energy efficiency of buildings, in particular when creating passive buildings of the "zero-energy" type are presented.

Keywords: *energy efficiency, passive building, renewable energy sources, fundamental engineering*

Основу нового наукового напрямку, сформованого в ІТТФ НАН України в останні роки, складає методологія організаційно-економічного та інноваційного забезпечення модернізації систем енергопостачання та підвищення енергоефективності будівель і споруд з урахуванням теплофізичних основ їх енергозабезпечення, термомодернізації та тренду використання низьковуглецевих технологій у тріаді енергетика-економіка-екологія стосовно сучасного технологічного устрою. В доповіді представлено основні напрямки фундаментальних наукових досліджень і втілення в економіку України їх результатів досліджень і реалізації запропонованих інноваційних науково-технічних заходів із підвищення енергоефективності будівельної сфери.

В середньому 90% свого часу людина проводить в будівлях. І в них потрібно створити належний мікроклімат, наприклад, згідно ДБН В.1.2-8:2021 (Основні вимоги до будівель і споруд. Гігієна, здоров’я та захист довкілля). Загалом, в Україні на енергоспоживання у будівлях і спорудах припадає близько 40% кінцевої енергії, зокрема 31,7% - на сектор житлових будинків (Мінрегіон України). Це найбільш енерговитратний сектор економіки України, тут зосереджений найбільший потенціал підвищення енергоефективності та декарбонізації енергетики, і саме цій сфері потрібно приділяти найбільше уваги. Будівля є кінцевим споживачем енергії, далі лише дисипація енергії через фасади в довкілля. Заощадження енергії в будівлі автоматично реалізуються при розподілі, транспортуванні і при генерації, адже енергоефективність у кінцевого споживача найбільш доцільна. Наразі річне теплоспоживання фонду будівель України у середньому становить близько 230 кВт·год/м^2, в той час як в ЄС цей показник знаходиться в межах 90-120 кВт·год/м^2, а у Німеччині – навіть 70-90 кВт·год/м^2. Спираючись на розгалужене законодавство (Закони України - «Про енергетичну ефективність будівель», «Про Фонд енергоефективності», «Про енергетичну ефективність») Україні вкрай необхідно досягати орієнтирів і рівня ЄС.

Окрім цього будівля – це:

- енергетичний об'єкт довготривалого життєвого циклу – до 100 років і більше;
- може виступати мініенергорегулятором ОЕС, потенційним енерговиробником і енергоакумулятором;
- мікрооб'єкт енергетичної безпеки, енергонезалежності, енергостійкості і живучості в екстремальних умовах;
- можливий елемент розосереджених, автономних чи індивідуальних енергосистем мікрокліматизації.
- Будівлі в Україні – це чутлива соціальна політика, а мешканці – потенційний електорат.

Основою обґрунтування та застосування наведених підходів виступає будівельна теплофізика як окрема частина більш широкої сфери застосування інженерної теплофізики, котра є місією діяльності Інституту технічної теплофізики НАН України.

Згідно Постанови Президії Національної академії наук України № 146 від 5 квітня 2023 р. в ІТТФ НАН України сформовано новий науково-технічний напрям «Фундаментальна теплофізична інженерія будівель в контексті відновлення України», основним завданням якого є науковий супровід та підтримка державної політики підвищення енергоефективності в сфері будівель, зокрема у реалізації Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року та у виконанні Національних планів дій: з енергетики та клімату; з відновлюваної енергетики; з енергоефективності; зі збільшення кількості будівель з близьким до нульового споживанням енергії. За період 2020-2024 рр. колективом відділу ТОЕТ видано 9 монографій (6 - у видавництві «Наукова думка»; ще 2 – англомовні, видані за кордоном); надруковано 78 наукових статей, що входять до наукометричної бази Scopus (31 із них - з квартилями Q1 і Q2); видано 38 статей в фахових журналах України категорії Б. Створена низка унікальних експериментальних стендів та дослідно-промислових установок. Реалізовано на практиці 145 впроваджень. Молоді вчені відділу отримали 3 премії Президента України для молодих вчених, 2 премії Верховної Ради України для молодих вчених, 3 премії міського голови м. Києва для молодих вчених. Ними отримана 1 премія НАН України та виконано 4 гранти Президента України для молодих науковців.

Основні наукові, технічні та інноваційні результати:

- Розробка, корегування та супровід заходів енергетичної стратегії України до 2050 р. стосовно: енергоефективності; теплоенергетики; відновлюваних джерел енергії, включаючи використання енергії довкілля та скидних теплових енергоресурсів.
- Обґрунтовані оригінальні підходи, принципи і методи рішення стратегічного управління технологічною модернізацією енергопостачання і підвищення енергоефективності теплозабезпечення будівель з застосуванням технологічних та організаційно-економічних інновацій, урахуванням тренду використання відновлюваних джерел енергії і інтелектуальних систем.
- Запропонована система індикаторів і гарантій технологічної модернізації теплозабезпечення будівель, які спрямовані на безпеку, збереження та підвищення якості життєдіяльності людини.

Вказані підходи сформували основні напрямки наукових досліджень, а саме: когенераційні технології сумісного виробництва теплоти і електрики; теплонасосні технології на природних та скидних техногенних енергоресурсах; пасивні будівлі, будівлі типу «0-енергії», інтелектуальні будівлі; теплова взаємодія будівель із довкіллям, вплив інсоляції; інноваційні системи теплової ізоляції; геотермальна вентиляція; низькотемпературні системи теплозабезпечення; дослідження нестійкості потоку теплоносія і запобігання її руйнівному впливу; ґрунтове акумулювання (добове, сезонне) теплоти, процеси вилучення теплоти; автономне електрозабезпечення на основі інсоляції і енергії вітру; глобальне потепління і адаптація до змін клімату.

Саме тому впродовж останніх п’яти років 2020-2024 рр. в ІТТФ НАН України для сфери будівель були успішно виконані фундаментальні теми:

- Акумуляційна система теплозабезпечення будівлі на основі використання відновлюваних джерел енергії та електроенергії нічного провалу електроспоживання;
- Аеродинаміка та теплообмін в світлопрозорих конструкціях при їх взаємодії з тепловим випромінюванням;
- Розроблення і оптимізація енергозберігаючих систем геотермальної вентиляції для енергоефективних будинків;
- Розроблення науково-технічних засад інтенсифікації тепломасообміну в пористих середовищах для матеріалів будівельних конструкцій та теплоенергетичного обладнання;
- Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозабезпечення;
- Аеродинаміка, теплообмін та інновації для підвищення енергоефективності віконних конструкції і їх використання для відбудови пошкоджених війною будівель України (договір №208/0172 конкурсу НФД України).

Для дослідження і реалізації інноваційних науково-технічних заходів із підвищення енергоефективності будівель було розроблено і збудовано на території Інституту технічної теплофізики НАН України унікальний експериментальний будинок (далі - будинок) пасивного типу як повномасштабний науково-дослідний стенд для вивчення теплофізичних властивостей перспективних теплоізоляційних будівельних матеріалів в реальних умовах їх експлуатації; будівельних фасадних конструкцій із них та інноваційних систем енерго(ресурсо)забезпечення. Загальна опалювана площа становить 306 м^2, тобто це аналог привабливого котеджу для середнього класу населення. Будинок

та його автоматизовані інженерні системи автономного енергозабезпечення облаштовані численними датчиками (температури, теплового потоку, вологості, тиску, лічильниками енергії, тощо) та системою неперервних автоматизованих діагностичних вимірювань і архівування параметрів стану (скважність - раз в 1…10 хвилин). Діагностика експлуатації будинку впродовж 11 років показала, що експериментальні питомі тепловтрати через стінові фасади будинку при температурі довкілля -10 °С становлять лише 1,2–1,8 Вт/м^2. а опір теплопередачі стінових фасадних конструкцій становить до 11,5 м^2·К/Вт, що в 3,3 рази вище нині діючих вимог ДБН В.2.6-33:2018. Опір теплопередачі світлопрозорих конструкцій зріс до 2,0 м^2·К/Вт, що в 2,2 раз перевищує діючий норматив. Питоме річне теплоспоживання такого пасивного будинку становить 14,8 кВт·годин/(м^2·рік) при температурі -1,1 °С (нормативна середня температура опалюваного періоду для клімату м. Києва) Зазначимо, що в ЄС при значно сприятливішому кліматі пасивний будинок споживає 15 кВт·годин/(м^2·рік). Для опалення та гарячого водопостачання використовується теплонасосна (6 кВт) акумуляційна низькотемпературна система. В якості низькопотенційної енергії використовується природна та/або закумульована теплота грунту чи води (в водозабірній свердловині). Для цього на територій біля будинку збудований цілий полігон грунтових теплообмінників різної геометрії (горизонтальні неглибокого залягання, вертикальні; трубні багатопетлеві, багатоходові, свердловинні; об'ємні насипні; типу грунт-вода (рідина), грунт-вода-вода, грунт-повітря). Як додаткове джерело теплоти використовуються сонячні теплові колектори (плоскі, трубно-вакуумні). Опалювальними приладами є: теплі водяні підлоги різної геометрії укладки, включаючи капілярну підлогу, тепла стіна, теплий простінок, підлогові та настінні фанкойли. Електропостачання реалізується сонячними BAPV панелями загальною площею 80 м^2 і потужністю 10 кВт (фотомодулі на полікристалічному кремнію та на тонких плівках з телуриду кадмію). Фотовольтаїка доповнена вітроагрегатом «Fortis Montana» потужністю 5 кВт та блоком гелєвокислотних акумуляторних батарей. В будинку облаштована кліматична камера реального клімату, що дозволяє цілорічно проводити діагностику стану вікон, будівельних і теплоізоляційних матеріалів та конструкцій з них.

Для модельного енергоспоживаючого повномасштабного об'єкту бюджетної сфери неперервно, впродовж періоду з 2007 р. і до сьогодні, проводиться моніторинг тепло- і електропостачання, а також діагностика тепловологісного стану адміністративного корпусу ІТТФ НАН України. В цій будівлі створено полігон із 20 різних енергоефективних вікон та полігон із 10 різних теплоізоляційних фасадних покриттів клеєного способу облаштування. На основі багатомільйонних дослідних діагностичних даних, отриманих з використанням сучасних автоматизованих вимірювальних установок, визначено і впроваджено енергоефективні режими енергопостачання, реалізовано раціональні режими примусового зменшення теплоспоживання в разі обмеженої присутності співробітників (період свят, літніх відпусток, пандемії), розроблено 2 «розумних» індивідуальних теплових пунктів, в т.ч. із використанням режиму нічного провалу електроспоживання, оптимізовано витрату фінансів на утримання будівель інституту в цілому. Експериментальні діагностичні дані з експлуатації утеплення стінових фасадів, доповнені модельними дослідженнями, показали збільшення ресурсу життєвого циклу цієї будівлі (проект 1966 р., збудована в 1973 р.) на 20%, а також встановили, що ефект утеплення призводить до зміни деформаційних напружень, зумовлених градієнтом температур, від розтягуючих (стіна без утеплення) до стягуючих (утеплена стіна), що сприяє підвищенню міцності будівлі і її надійності, як теплосприймаючого об'єкта.

Серед отриманих фундаментальних і практичних результатів слід відмітити наступні:

- розрахункові дослідження показали, що для клімату м. Києва для південної орієнтації фасадів будівель за рахунок інсоляції додатково поступає до 30% теплоти, необхідної для опалення;
- застосування клейового утеплення на основі теплоізоляційних матеріалів із високою паропровідністю дозволяє уникнути появи зон конденсації парів води і підвищує ресурс експлуатації будівлі;
- збільшення відстані між стеклами в склопакеті вікна призводить до появи вихорів Релея–Бенара, які впливають на термічний опір конструкції;
- використання для рекуперативної вентиляції канального ґрунтового теплообмінника призводить до того, що повітря на виході із нього має температуру впродовж року в діапазоні від +2 °С до +18 °С при відповідних вхідних температурах в межах від -18 °С (зимою) і до +37 °С (влітку). Така геотермальна вентиляція взимку сприяє системі опалення, а влітку, відповідно, системі кондиціонування. Більш того, на основі природної теплоти ґрунту за допомогою насипних ґрунтових теплообмінників змодельована і реалізована теплова повітряна завіса фасадів і даху будівлі;
- встановлена оптимальна геометрія положення віконної конструкції по товщині віконної пройми;
- показана доцільність встановлення додаткового теплоізоляційного коробу між віконною конструкцією і віконною проймою фасадної стіни;
- енергетичний моніторинг будівель і їх інженерних систем проводився за допомогою мобільної вимірювальної лабораторії та ліцензійних програм ENSI (Норвегія) і AUDYTOR OZC (Польща).

Прикінцево зазначимо. що науковий напрямок **«**Фундаментальна теплофізична інженерія будівель» для теплоенергетики (а для енергетики загалом - фундаментальна енергетична інженерія), який пов’язаний з різними практичними програмами із застосуванням новітніх технологій, може бути основою пріоритетних наукових досліджень і науково-технологічних розробок, спрямованих на створення новітньої конкурентоспроможної науково-технічної продукції, необхідної в умовах воєнного часу, що відповідає ключовим цілям и завданням «Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року».

Запропонований матеріал є частиною змісту заявки ІТТФ НАН України на проєкт «Фундаментальна теплофізична інженерія для підвищення енергоефективності будівель», поданої на конкурс «Передова наука в Україні 2026-2028» до Національного фонду досліджень України.

UDC 519.6, 621.311.243

COMPUTER MODELING OF THE ENERGY FLOWS IN THE FLAT SOLAR PV/T PANEL

L. Knysh

Oles Honchar Dnipro National University,
72, Gagarin Avenue, Dnipro, Ukraine, 49000
phone: (099) 003-43-10, e-mail: lknysh@ukr.net

Design of the combined flat solar PV/T panel for simultaneous generation of heat and electricity was proposed. The mathematical model of the energy transfer in PV/T was developed. The conducted computer modeling showed the wide prospects for use of proposed energy systems.

Key words: *solar PV/T panel, solar cells, heat transfer fluid, non-stationary mathematical model, computer modeling, heat stabilization*

ORCID: 0000-0003-3525-4804

The combined solar PV/T panels are becoming increasingly popular for the simultaneous generation of heat and electricity. Moreover, the heat transfer fluid in these panels can additionally cool the solar cells, and it has a positive effect on their efficiency. A new design of PV/T panels was proposed in this study. It was assumed that the heat transfer fluid moves in a glass channel on the front side of the classic polycrystalline solar panel. The PV/T panel was considered as a multilayer body with ideal thermal contacts between the layers.

The thermal regime in PV/T panels was determined based on a non-stationary 1D lumped-parameter mathematical model [1]. The mathematical model included a system of sixth nonlinear differential equations that take into account all external and internal energy impacts. Based on the mathematical model, the numerical algorithm and interactive software were developed. The interactive software is implemented using Wolfram Cloud technology. Climate data are transferred into the software from world databases [2].

For a selected day of the year, the daily temperature distribution in each layer of the PV/T solar panel was found. Despite the presence of a heat transfer fluid on the front side, it was determined that the solar cells have the highest temperature in the PV/T panel. The temperatures of solar cells in a PV/T panel were compared with the temperature of solar cells in a similar polycrystalline solar panel without a heat transfer fluid. The comparison showed that the presence of a heat transfer fluid layer on the front side of the PV/T panel leads to a slight decrease in temperature of the solar cells during the period of maximum insolation. In addition, the circulation of the heat transfer fluid in the channel ensures relative thermal stabilization of the solar cells, smoothing out temperature peaks and shifts in them. A significant increase in temperature of the heat transfer fluid was observed in the PV/T panel, so such a panel can be used as a source of low-potential thermal energy.

The influence of the initial temperature of the heat transfer fluid and its mass flow rate on the thermal regime in the PV/T panel was determined during computer modelling. It was found that the temperature gradient in the heat transfer fluid increases due to a decrease in the initial temperature of the heat transfer fluid. An increase in the mass flow rate of the heat transfer fluid leads to a rise in the temperature of both the solar cells and the heat transfer fluid. This is because an increase in the mass flow rate of the heat transfer fluid contributes to the intensification of convective heat exchange in the channel. This leads to a rise in the temperature of the heat transfer fluid and an increase in the PV/T panel thermal efficiency. At the same time, if the mass flow rate grows, then the solar cell temperature also increases, leading to a drop in the PV/T panel energy efficiency. Thus, the choice of the optimal value of the mass flow rate of the heat transfer fluid is directly related to the customer's requirements. Therefore, determining the optimal mass flow rate of the heat transfer fluid will be a separate significant problem in future studies.

REFERENCES

1. Zakharov D.V., Knysh L.I. Non-stationary mathematical model of the temperature distribution in solar panel layers, Technical mechanics, 2023, №3, P. 79-87.
2. Knysh L.I., Zakharov D.V. Non-stationary mathematical model of the temperature distribution in solar panel layers under real operational conditions, Collection of Abstracts of the XXV International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in XXI", May 22 – 24, 2024, Kyiv, P. 202.

ANALYSIS OF MECHANICAL STABILITY OF SILICON WAFERS FOR PHOTOVOLTAIC ENERGY CONVERTERS

Rayimjon Aliev[1], Dilnoza Khonbutayeva[2], Oybek Bozarov[3]

Andijan State University,
129 University str., Andijan, Uzbekistan, 710100
phone: (998) 90-216-72-60, e-mail: alievuz@yahoo.com

The mechanical stability of silicon wafers for solar cells was analyzed using digital modeling and experiment. A new design of a flexible photovoltaic energy converter has been developed.

Key words: *silicon, flexible, photovoltaic energy converter, mechanical stability, digital modeling.*

ORCID: [1]0000-0002-7375-727X, [3] 0009-0001-5093-2637

To significantly expand the scope of application of silicon solar cells and panels, it is not often necessary to coat non-flat surfaces of various objects with them [1]. Therefore, there is a need to develop flexible solar cells (SC) and solar panels (SP). Note that thin-film solar cells made of amorphous silicon and other materials have fairly high flexibility. At the same time, such solar cells do not have high efficiency and stability of photoelectric characteristics [2]. The task of developing flexible SCs from silicon SCs is considered urgent. To do this, it is advisable to take advantage of the limited flexibility of silicon wafers by choosing their different thicknesses and narrow-bandwidth shapes. In other words, it is relevant to study the mechanical stability of silicon wafers of various shapes and thicknesses, as well as solar cells manufactured on the basis of such wafers.

During the research, a new computer software product was developed, based on the use of the "COMSOL Multiphysics®" platform and allowing to effectively simulate the mechanical properties of silicon wafers and determine the optimal geometric and physical parameters for creating flexible photovoltaic systems. The distribution of mechanical parameters of silicon wafers for solar cells, such as stress forces, deformations, displacements, etc., depending on the shape, size and thickness, was determined by calculation.

The simulation results suggest that, based on the results obtained, by varying the thickness and length of the silicon wafer, it will be possible to control the elastic strain energy while minimizing the elastic energy of the system as a function of displacements.

The results of an experimental study of silicon wafers show the existence of a limit to the mechanical stability of various shapes and sizes of solar cells. At the same time, it is shown that shapes do not significantly affect the efficiency of SCs made from silicon wafers. Thus, it is possible to create narrow-width and long solar cells with fairly high efficiency. This makes it possible to create flexible PV modules with a higher curvature range to cover both convex and concave surfaces.

A new semiconductor photovoltaic module has been developed, which differs from its analogues in that narrow, (linear) rectangular silicon p-n-structures with width xo and length l, installed on rigid substrates of identical shape and size, which are fixed on a flexible lower base - the carrier film, are used as solar cells [3]. Moreover, the step distance between adjacent SEs Δx is $\Delta x=(0.1\div0.2)xo$ for use on an external curved (convex) surface and $\Delta x\geq xo$ for an internal curved (concave) surface. Individual silicon solar cells are connected in parallel, which means their photocurrents for a whole series of solar cells are summed up. It is envisaged that such rows of solar cells can be connected in series, providing summation of the photo electromotive force.

The signs of "parallel connection of all solar cells in a row" can significantly increase the value of the photocurrent, and also "serial connection of rows" can significantly increase the photovoltaic emf, therefore increasing the efficiency of the photovoltaic flexible module. Experiments on creating solar cells on silicon wafers and flexible photovoltaic systems have demonstrated their high efficiency (from 14% to 18%) and stability of characteristics.

REFERENCES

1. Gremenok V. F. Solnechnyye elementy na osnove poluprovodnikovykh Materialov. V. F. Gremenok, M.S. Tivanov, V. B. Zalecskiy. – Minsk: Izd. Tsentr BGU, 2007. – 222 s. il., tabl. – ISBN 985-476-443-5.
2. Thin-film modules made of amorphous silicon. // 15.01.2024. P. 1-10. https://www.solarhome.ru/solar/pv/asi.htm
3. Aliev R., Gulomov Zh.Zh., Khonbutaeva D.A., Goipov E.A., Shengyi Yang, Kurbonov A.O., Alieva Zh.R., Khaidarov D.M. Semiconductor photovoltaic module. Patent UZ FAP 02172, 04/21/2022. Published in the Official Bulletin of the AIS RUz No. 1, 01/31/2023. 96-97 pp.)

OPTICAL PROPERTIES OF MONOFACIAL AND BIFACIAL SOLAR CELL USING SENTAURUS TCAD SOFTWARE

R. Aliev [1], M. Komilov[1], S. Aliyev[2]
Andijan state university, Andijan state technical university
129 University str, Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99893) 257-80-27, e-mail: komilovmdotcom94@gmail.com

Abstract: *The main task of this scientific research work is the effective use of solar energy, one of the renewable energy sources. Accordingly, this is intended to be achieved by creating a reflective layer in simple solar cells and bifacial solar cells. According to the results, it was found that the current density reached 28 mA/cm^2 for the bifacial solar cell and 22 mA/cm^2 for the simple solar cell. To achieve the shown result, SiO2 was adopted as the anti-reflection layer for both types of solar cells, and this was coated on the sample surface at a thickness of 100nm.*

Key words: *silicon, Sentaurus TCAD, monofacial solar cell, bifacial solar cell, .*

ORCID: [1]0009-0006-2080-3371

Science and manufacturing industry are developing rapidly worldwide. This situation has led to an increase in the demand for energy in all countries. Since energy resources are limited in nature, it is convenient and effective to use renewable energy sources. In particular, the use of solar energy is very promising. The conversion of solar energy into electricity is carried out through solar panels. The main 95% of solar panels are made of silicon material [1]. Solar panels convert light energy into electricity, so it is very necessary to study the optical processes in them. For a long time, a simple solar cell has been used, but now the use of bifacial solar cells is highly effective. Bifacial solar cells receive more light than simple solar cells. Simple solar cells receive light from one side, while two-sided sensitive solar cells also receive diffusely scattered light due to the presence of the earth's albedo [2]. This research work aims to improve the efficiency of single-sided and double-sided photosensitive solar cells by coating them with an anti-reflection layer. For this, calculations were performed by modeling single-sided and double-sided photosensitive solar cells with a thickness of 20 µm using the Sentaurus TCAD software.

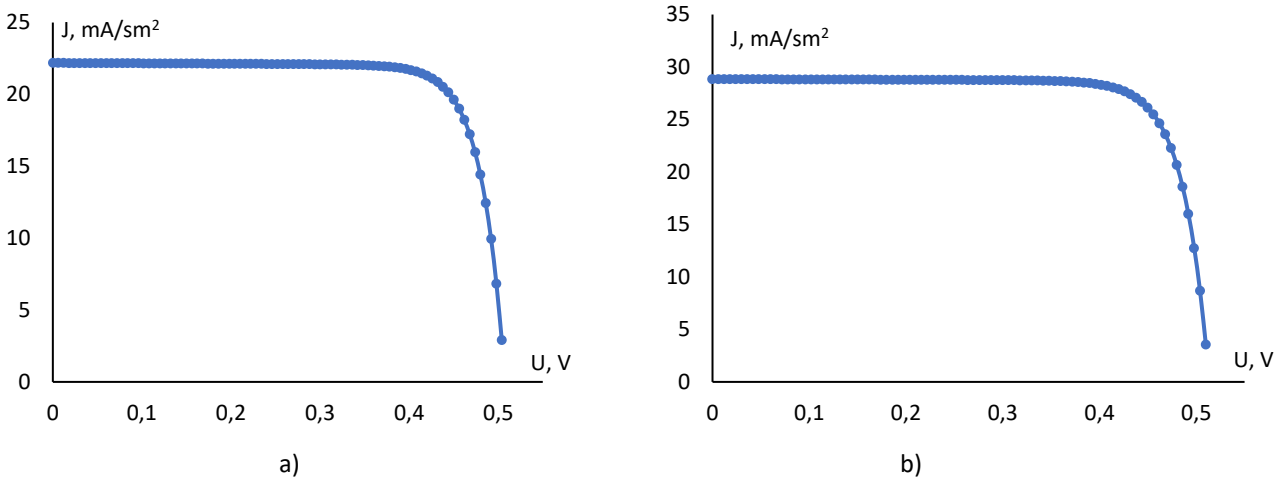


Fig 1. I-V character of a) simple solar cell, b) bifacial solar cell

From Fig 1-a, it can be seen that a short-circuit current density of 22 mA/sm^2 was achieved for a simple solar cell. From Fig 1-b, bifacial solar cells 28 mA/sm^2 was achieved. The results show that the bidirectionally sensitive solar cell has achieved higher efficiency than the conventional solar cell. This experiment was achieved by exposing both types of solar cells to direct light. In the future, it is planned to conduct research on the bidirectionally sensitive solar cell under different light exposure.

REFERENCES

1. William Shockley and Hans J Queisser, Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, Journal of Applied Physics Vol 32, DOI: 10.1063/1.1736034.
2. Ersagun Türkdoğru, Mahir Kutay, Analysis of albedo effect in a 30-kW bifacial PV system with different ground surfaces using PVSYST software, Journal of Energy Systems, DOI: 10.30521/jes.1105348

DEVELOPMENT OF PHOTOELECTRIC ENERGY DEVICES IN 3D FORMAT

N. Mirzaalimov [1], R. Aliev [1], X. Mamatojiyeva[1], M. Komilov [2], A. Mirzaalimov [2], M. Miryusupova [2]

[1]Andijan state university, 129 University str, Andijan, Uzbekistan, 170100
[2]Andijan state pedagogical institute, 4, Do'stlik str., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99897) 755-93-00, E-mail: mirzaalimov90@mail.ru

Today, the need for electricity is mainly focused on renewable energy sources, due to the fact that most of the traditional energy sources in the world are depleting and have a bad effect on the environment when they are used. The most ecologically clean and promising type of renewable energy sources is the energy obtained through photovoltaic energy devices. In this research work, the practical development of optimal designs based on the modeling of new photoelectric energy devices that can cool themselves by rotating around their axis, technically adapted to the climate, is considered.

Key words: *Efficiency, rotating, climate, photoelectric energy device, solar cell, cooling.*

ORCID: [1]0000-0002-9264-3710; [2]0000-0002-7375-727X; [4]0009-0006-2080-3371; [5]0000-0003-2846-1901

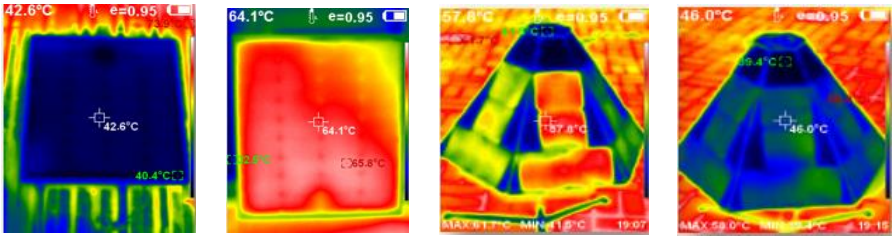
A vast amount of energy from the Sun reaches the Earth every hour. Given the availability of this immense and clean energy source, transitioning to solar energy utilization is inevitable. Countries such as the United States, China, Germany, Australia, and Japan have been generating substantial amounts of electricity from solar energy for several years [1].

Energy obtained through photovoltaic (PV) systems is considered one of the most environmentally friendly and promising renewable energy sources. Due to the increasing global energy demand, the installation rate of solar photovoltaic power plants has been rising significantly. Since solar panels are installed in various geographical locations, their efficiency varies depending on regional conditions. Additionally, one of the critical challenges for solar panels is the excessive heating of the surface due to high ambient temperatures, which leads to a reduction in efficiency.

We experimentally investigated this process and, using the expression given in equation (1), determined the variation in the surface temperature of a photovoltaic panel exposed directly to sunlight in an open environment over a period of 8 minutes.

$$\beta = \frac{T_2 - T_1}{t_{time}} \tag{1}$$

As shown in Figure 1 (a, a'), the temperature coefficient of the flat-surfaced solar panel was found to increase at a rate of β = 2.76 °C/min per minute. This resulted in a 30% reduction in the output power of the solar panel.



a *a'* *b* *b'*

Figure 1. FLUS IR-892 thermal imaging image of the surface temperature of a flat surface solar panel increasing over time and the surface temperature of 3D photoelectric energy device decreasing over time

During the 8-minute experiment, the ambient temperature increased from 41°C to 64°C on the surface of the solar panel.

Extensive research is being conducted by scientists worldwide to enhance the efficiency of solar panels and modules, develop optimal devices, and promote their widespread adoption. To address this issue, a novel 3D-format photovoltaic energy device (PVED) with a vertical-axis pyramid-shaped structure, featuring self-cooling properties and technical adaptation to climatic conditions, has been proposed. [2]

As shown in Figure 1 (b, b'), when the rotational angular velocity was ω = 4 rad/s, the temperature coefficient of the PVED decreased by β = -1.87 °C/min as the pyramid-shaped device rotated around its vertical axis.

Experimental studies have demonstrated that the silicon-based pyramid-shaped 3D-format photovoltaic energy device exhibits significant advantages over conventional flat-surfaced modules. In particular, this innovative device has been

shown to improve energy conversion efficiency by 33–40%. During the research process, the technical and economic parameters of the device were evaluated to determine its operational advantages, and the mechanisms for achieving high efficiency were analyzed. Due to its geometric characteristics specifically, its three-dimensional structure and optimized heat dissipation properties, it was found that the device effectively reduces the temperature coefficient and ensures long-term stable operation.

The obtained results confirm the potential of this technology for the development of high-efficiency and environmentally friendly photovoltaic systems in the future.

REFERENCES

1. https://www.mahindrateqo.com/blog/impact-of-temperature-on-solar-panels-efficiency/.
2. J. Gulomov, R. Aliev, N. Mirzaalimov, B. Rashidov, J. Alieva Study of Mono- and Polycrystalline Silicon Solar Cells with Various Shapes for Photovoltaic Device with 3D Format: Experiment and Simulation // Journal of Nano- and Electronic Physics. Volume 14 (2022 Year), No.5, p. 05012-1 - 05012-8.

УДК 004.311.25.

SOFTWARE FOR ENERGY MANAGEMENT SYSTEM DURING THE SELECTION OF A SOLAR COLLECTOR FOR HEATING SOCIAL AND ADMINISTRATIVE BUILDINGS

I. Segeda[1], V. Mamalyga[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Prospect Beresteiskyi, 37, Kyiv, 03056, Ukraine
tel: (050) 695-54-44, e-mail: Irynaseg@gmail.com
tel: (067) 905-59-60, e-mail: v.mamalyga@gmail.com

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used based on the use of logical arguments and concepts of software development for the functioning of energy management.

Key words: *software, energy management, solar collector.*

ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ПІД ЧАС ВИБОРУ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА ДЛЯ ОПАЛЕННЯ СОЦІАЛЬНО-АДМІНІСТРАТИВНИХ БУДІВЕЛЬ

І. В. Сегеда[1], М. М. Мамалига[2]

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Украина,
тел: (050) 695-54-44, e-mail: Irynaseg@gmail.com
тел.: (067) 905-59-60, e-mail: v.mamalyga@gmail.com

Під час розв'язання поставлених у роботі завдань використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі використання логічних аргументів і концепцій розробки програмного забезпечення для функціонування енергетичного менеджменту

Ключові слова: *програмне забезпечення,енергетичний менеджмент, сонячний колектор.*
ORCID: [1] 0000-0003-1958-4985; [2] 0000-0003-3650-2574

There are a lot of computer programs for analysing energy consumption in the IT market that are being developed and used today. These programs are expected to help the city's energy managers in strategic planning, improving energy efficiency, etc. Energy management is an important component for organizations, as it helps to reduce energy costs, increase efficiency, and promote sustainable development. The economic benefits of cost control and energy metering are achieved through a number of factors and methods. One of which is the transition to the use of alternative energy sources, such as solar collectors, which can reduce dependence on expensive energy sources and lead to economic benefits [2].

The purpose of the work is to develop a software product with functionality that provides system users with tools for selecting the optimal solar collector for the heating system of residential, social, and administrative buildings.

The system for selecting solar collectors for heating residential and social and administrative buildings should perform a number of tasks: filling the database with data and parameters for the correct operation of the system; recording and reading input information about the parameters of solar collectors, both when working with the database and when working with the software product as a user; calculating the efficiency of the solar collector, taking into account the parameters of influence and installation features; calculating the heat loss of the room; calculating the cost of installation. The scheme of interaction between the program modules is shown in Figure 1.

The modular structure of a program is a division of the program code into separate functional modules with defined tasks and results. Each module in the developed system performs a specific function and can operate independently of other modules. The system consists of the following modules: module for generating collector selection on request; module for working with the user; module for generating a user request; calculation module; database; database management system.

The use of a solar collector selection system as an alternative to heating residential, social, and administrative buildings ensures profitability and saves significant resources in the selection of the required type of equipment. During the review of the market of software for modelling solar collector selection systems, it was found that there are various software products that provide opportunities for calculating heat losses, power output and analysis of solar collectors. The choice of the appropriate software depends on the specific requirements and capabilities of the project. The content of the database ensures the correct operation of the system. The database contains all the necessary data and parameters for calculating and analyzing the efficiency of solar collectors. Recording and reading of input information about the parameters of solar collectors are implemented in the database. This allows for convenient and efficient input data management and ensures their availability for further analysis. The efficiency of solar collectors was calculated taking into account the parameters of influence and installation features. This made it possible to objectively assess the potential energy that can be obtained from the collectors and determine their suitability for a particular facility.

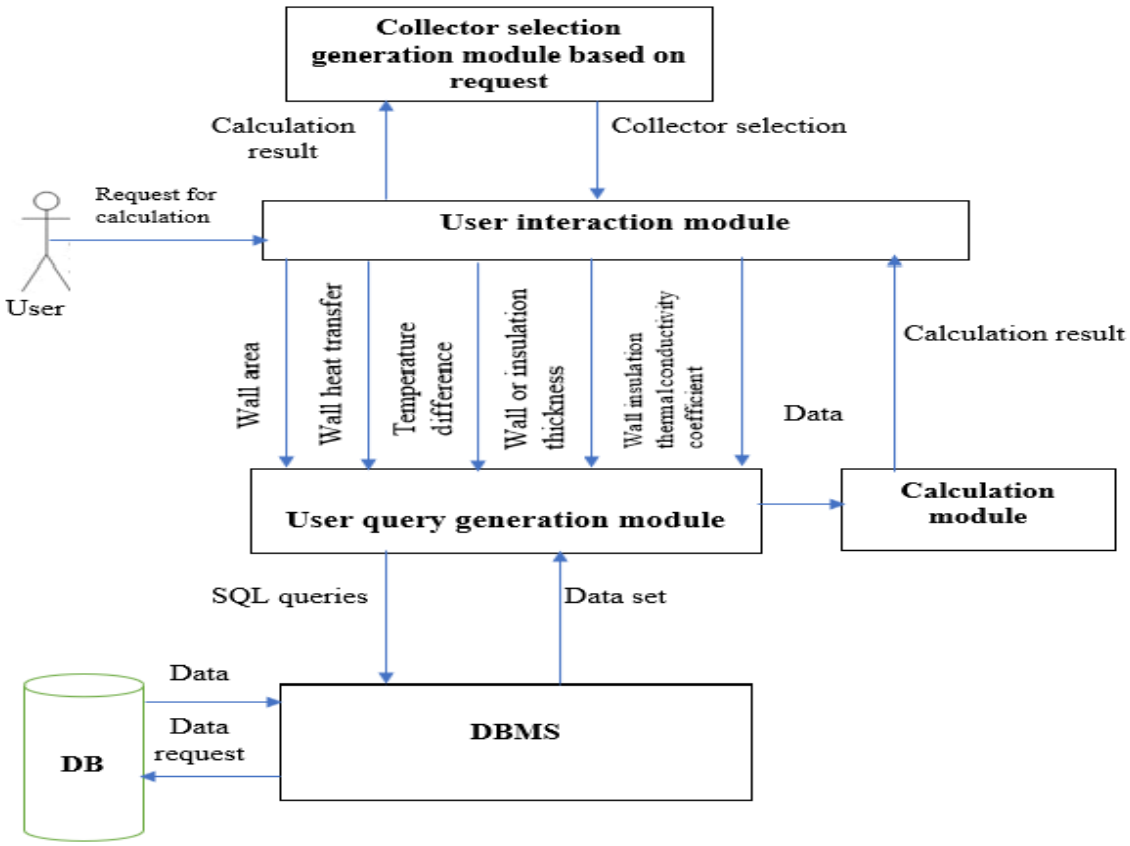


Fig. 1. Scheme of interaction of program modules of the system

The system calculates the heat loss of premises, which helps to determine the required power of solar collectors to meet heating needs. This facilitates planning the effective use of solar energy and ensures comfort in the premises. It has been determined that the calculation of heat losses is an important component of the design of heating systems, the process allows you to set the required system power and ensure efficient use of energy. Accurate calculation of heat losses helps to determine the optimal size of solar collectors and heating systems. The needs and requirements that such a system should meet, in particular, in residential, social and administrative buildings, were assessed. This helps to determine the optimal characteristics of solar collectors and choose the right system for the given conditions and requirements. An extensive analysis and definition of the system algorithms were also carried out. A programming language and development environment were selected. A database was developed and a user interface was selected. It is important to note that the system takes into account the change in the value of money over time. This helps to make informed decisions regarding the cost and profitability of a solar collector system. In addition, the use of data visualization and graphs makes it easy to perceive information and draw clear conclusions. It has been established that the purchase and installation of solar panels may require certain costs, but their operation is effective and economically beneficial in the long term. This is important information for making a decision on the use of solar collectors in the construction sector and when considering energy management issues. As a result, a draft commercial offer is formed for the customer, which contains detailed information on the cost of the project, expected economic benefits and other important factors. This helps to establish trust and helps to make a decision on the implementation of the project.

REFERENCES

1. Seheda I.V., Mamalyha V.M. Software in the system of energy management. Sustainable development – XXI century. Discussions 2023: Proceedings of the VIII International Scientific and Practical Conference / National University of Kyiv-Mohyla Academy / ed. Prof. Khlobystova E.V. – Kyiv, 2024. – P.192-197 – Electronic edition. DOI:10.13140/RG.2.2.33528.25602
2. Expert review of energy monitoring and energy management software Association "Energy Efficient Cities of Ukraine" Lviv – 2018, p.33 . URL: https://enefcities.org.ua/upload/files/Publications/Analytics/Expert_review_SW_2018.pdf (дата звернення: 06.02.2025).

УДК 621.311.2

ЕНЕРГЕТИЧНІ КОМПЛЕКСИ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ТА НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Я. В. Гавриленко[1] , В. О. Дерій[2]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (066) 790-87-20, e-mail: yasx80@gmail.com

У роботі проведений огляд стуктур енергетичних комплексів на базі сонячних електростанцій та акумуляторних систем накопичення енергії. Проаналізовані різні типи приєднання накопичувачів до сонячних електростанцій.

Ключові слова: *сонячна електростанція, накопичувач електроенергії, приєднання з боку змінного струму, приєднання з боку постійного струму.*

ENERGY COMPLEXES OF SOLAR POWER PLANTS AND ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS

Y. Havrylenko[1], V. Derii[2]

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (066) 222-87-20, e-mail: yasx80@gmail.com

The paper reviews the structures of energy complexes based on solar power plants and battery energy storage systems. Various types of connection of accumulators to solar power plants are analyzed.

Key words: *solar power plant, electricity storage, AC coupled, DC coupled.*

ORCID: [1]0000-0003-2382-5411; [2]0000-0002-5689-4897

Бурхливий розвиток сонячних електростанцій (СЕС) призвів до появи низки проблем в енергосистемах світу через їх стохастичний (негарантований) режим роботи [1]. Одним із можливих варіантів вирішення цієї проблеми є застосування накопичувачів електричної енергії (EESS) [2]. Із відомих технологій EESS [3, 4] для СЕС найбільш підходящим варіантом є акумуляторні системи накопичення та зберігання енергії (BESS), особливо для розподілених енергосистем. Популярність BESS обумовлена їх доступністю, здешевленням, високою швидкодією та щільністю накопичення енергії, достатньою потужністю, що дозволяє застосовувати їх для регулювання частоти і потужності енергосистем. BESS дає змогу зберігати електроенергію, вироблену сонячними панелями під час пікових годин генерації, та використовувати її в періоди низької продуктивності або підвищеного попиту. Це робить BESS критично важливою для забезпечення стабільного й надійного електропостачання.

До основних характеристик BESS належать ємність і номінальна потужність системи, тривалість накопичення енергії та специфічні додаткові вимоги залежно від конкретного випадку застосування [5]. Ємність визначає обсяг енергії, який може бути збережений BESS. Номінальна потужність показує, яку максимальну кількість енергії BESS здатна видавати у визначений момент часу. Тривалість зберігання енергії визначає, як довго система може видавати електроенергію заданого рівня. Специфічні вимоги щодо застосування системи – це безпека, вплив навколишнього середовища та відповідність нормативним стандартам.

Існує дві основні схеми приєднання BESS до гібридних енергетичних комплексів на основі сонячних електростанцій]:

1. Схема приєднання BESS до СЕС з боку змінного струму (AC Coupled).
2. Схема приєднання BESS до СЕС з боку постійного струму (DC Coupled), яка має різновидність – реверсивна DC Coupled система.

Основний принцип роботи BESS та СЕС при AC Coupled підключенні полягає в тому, що під час генерації електроенергії сонячні панелі виробляють постійний струм, який за допомогою сонячного інвертора перетворюється на змінний струм. У системах з AC Coupled акумулятор BESS заряджається від систем змінного струму окремим приєднанням, що отримують енергію від приєднання сонячної станції або мережі (енергосистеми). Для зарядки / розрядки акумуляторів використовується двонаправлений інвертор, що перетворює енергію змінного струму на постійний, і навпаки. Режим сумісної роботи BESS та СЕС при AC Coupled підключенні контролює система керування

енергією (EMS), що задає різноманітні сценарії для такого енергетичного комплексу залежно від призначення. Такий комплекс є найпоширенішим для великих систем завдяки своїй універсальності.

Основний принцип роботи BESS та CEC при DC Coupled підключенні полягає в тому, що під час генерації сонячними панелями електроенергії, більшої за встановлену технічними умовами потужність енергетичного комплексу, або в періоди часу, коли оператор мережі дає команду на обмеження видачі потужності в мережу, згенерована енергія перетворена через оптимізатор потужності (DC-DC перетворювач) заряджає акумуляторні батареї BESS. Збережена в енергію в BESS буде використана, і акумулятори почнуть розряджатися, коли сонячна активність спаде нижче встановленої потужності за умови, що оператор системи передачі не обмежуватиме потужність енергетичного комплексу. Оптимізатор потужності змінить постійну напругу до необхідного рівня, а інвертор перетворить на напругу змінного струму для подальшої передачі в мережу. Зарядка і розрядка акумуляторів відбувається на стороні постійного струму, перетворення напруги при заряджанні / розряджанні акумуляторів BESS з постійного в змінний в інверторі не відбувається.

Застосування реверсивного DC Coupled приєднання дозволяє працювати в автономному режимі (мікромережі) завдяки тому, що використовується сумісний з мікромережами інвертор для накопичення енергії.

Основними нормативно-правовими актами, які регулюють діяльність із збереження електроенергії, є Закон України «Про ринок електричної енергії» № 2019-VIII від 13.04.2017 та Закон України «Про альтернативні джерела енергії» № 555-IV від 20.02.2003. 16 червня 2022 року набирав чинності Закон N 2046-IX «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії», який вперше врегульовує питання експлуатації установок зберігання енергії на ринку електроенергії. Закон N 2046-IX враховує основні принципи правового регулювання установок зберігання енергії в країнах ЄС та сприяє використанню цих систем, збалансує роботу енергосистеми та сприятиме синхронізації української енергосистеми з європейською ENTSO-E []

Діяльність зі зберігання енергії може здійснюватися без ліцензії, залежно від статусу суб'єкта, виробниками електроенергії з альтернативних джерел та активними споживачами.

Енергетичний комплекс BESS та CEC можливо використовувати для забезпечення таких потреб:

1) функціонування на ринку ЕЕ як виробник з прогнозованою потужністю;
2) використання BESS у складі розумних мереж для моніторингу, управління та оптимізації розподілу енергії;
3) як активний споживач;
4) як учасник ринку «на добу наперед» та внутрішньодобового ринку, де здійснюється купівля-продаж електроенергії;
5) як учасник балансувального ринку та ринку допоміжних послуг.

ПОСИЛАННЯ

1. Hotra, O., Kulyk, M., Babak, V., Kovtun, S., Zgurovets, O., Mroczka, J., & Kisała, P. (2024). Organisation of the Structure and Functioning of Self-Sufficient Distributed Power Generation. Energies, 17(1), 27. https://doi.org/10.3390/en17010027 (дата звернення: 06.03.2025).
2. Zgurovets, O., Kulyk, M. (2023). Application of Energy Storage for Automatic Load and Frequency Control. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Derevianko, D., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 220. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_4 (дата звернення: 06.03.2025).
3. Дерій В. О. Накопичувачі електричної енергії. Системні дослідження в енергетиці. Вип. 1(72) 2023. С. 12–24. https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012 (дата звернення: 04.03.2025).
4. Zaporozhets, A., Kostenko, G., Zgurovets, O., Deriy, V. Analysis of Global Trends in the Development of Energy Storage Systems and Prospects for Their Implementation in Ukraine Studies in Systems, Decision and Control, 2024, 512. P. 69–87. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_4 (дата звернення: 06.03.2025).
5. Blackridge Research & Consulting. Why is BESS Needed to Harness the Maximum Potential of Solar Energy. https://www.blackridgeresearch.com/blog/what-is-solar-battery-energy-storage-system-bess (дата звернення: 06.03.2025).
6. Гавриленко Я. В., Дерій В. О. Формування правових засад функціонування та розвитку «зеленої» енергетики. Системні дослідження в енергетиці. Вип. 4(80) 2024. С. 120–133. https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.120 (дата звернення: 06.03.2025).

GEOMETRIC OPTIMIZATION OF LAYERS IN INVERTED PEROVSKITE SOLAR CELLS USING TCAD SIMULATION

Irodakhon Gulomova[1], Rayimjon Aliyev[2]

Andijan state university,
129 University St., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99899) 443-70-42, e-mail: irodakhon.gulomova@yahoo.com

Abstract: *Due to the optical properties of the electron transport layer (ETL) and hole transport layer (HTL), inverted perovskite solar cells can perform better than traditional perovskite solar cells. It is essential to compare both types to understand their efficiencies. In this scientific work, we studied inverted perovskite solar cells with $NiO_x/CH_3NH_3Pb_3$/ETL (ETL = MoO_3, TiO_2, ZnO) structures. We found that the efficiencies of inverted perovskite solar cells with ZnO, MoO_3, and TiO_2 as ETLs, and with optimal layer thicknesses, are 30.16%, 18.69%, and 35.21%, respectively.*

Key words: *perovskite, inverted structure, thickness, metal oxides, photoelectric parameters*

ORCID: [1]0009-0007-6760-0018

Today, the demand for energy is increasing rapidly. To meet the growing need for electrical energy while preserving the environment and resources, we must turn to renewable energy sources. Among these, wind and solar energy are particularly popular. Solar cells are used to convert solar energy into electrical energy. In industry, silicon solar cells are predominantly produced [1]. However, in the last 15 years, there has been growing interest in perovskite solar cells.

Our primary mission was to determine a better structure for perovskite solar cells, whether inverted or traditional. Traditional perovskite solar cells have a design where light hits the electron transport layer first, while inverted perovskite solar cells have a reversed design, with light hitting the hole transport layer first [2]. Current research of inverted perovskite solar cells is focused on improving their efficiency and long-term durability to make them even more competitive with other types of solar cells. In this scientific work, we studied inverted perovskite solar cells with NiOx/CH3NH3Pb3/ETL (ETL = MoO3, TiO2, ZnO) structures. Figure 1 illustrates the geometric structure of the solar cell, highlighting variables such as the thickness of the electron transport layer (ETL), hole transport layer (HTL), and perovskite layers, which were adjusted within a specified range.

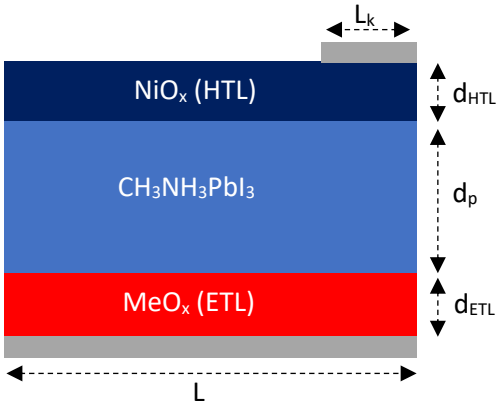


Figure 1. Geometrical structure of an inverted perovskite solar cell. L_k—width of contact region, d_{HTL}—thickness of HTL, d_p—thickness of perovskite layer, d_{ETL}—thickness of ETL, L—width of solar cell

To determine the optimal geometric dimensions of the inverted perovskite solar cell, the thicknesses of the ETL and HTL layers were systematically varied from 20 nm to 200 nm, while the perovskite absorber layer thickness was adjusted between 200 nm and 1600 nm. Our results showed that the optimal thickness of NiO_x is 80 nm for all structures. The optimal perovskite thickness is 600 nm for solar cells with ZnO and MoO_3, and 800 nm for those with TiO_2. For the ETLs, the best thicknesses are 100 nm for ZnO, 80 nm for MoO_3, and 60 nm for TiO_2.

REFERENCES

1. William Shockley and Hans J Queisser, Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, Journal of Applied Physics Vol 32, DOI: 10.1063/1.1736034.
2. Gulomov, J.; Accouche, O.; Aliev, R.; Neji, B.; Ghandour, R.; Gulomova, I.; Azab, M. Geometric Optimization of Perovskite Solar Cells with Metal Oxide Charge Transport Layers. Nanomaterials 2022, 12, 2692. https://doi.org/10.3390/nano12152692.

PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE USE OF CONCENTRATED ENERGY PLANTS WITH PHOTOCONVERTERS

***X. Izzatullayev*[1]**

Doctorate student of Andijan State University
[1]Andijan State University

The efficiency of solar energy conversion using semiconductor elements is being developed in the following areas: increasing the efficiency of photovoltaic cells through the search for new materials and methods of their processing; use of solar energy concentrators; development of solar orientation systems; creation of cogeneration plants for more efficient use of solar energy. Among the types of solar cells currently being developed, silicon photoconverters (due to their low cost and well-established manufacturing technology) and multijunction heterostructures (GaInP/GaIn/Ge), which have the highest efficiency, are of interest. The latter type of photocells has the greatest efficiency in concentrated solar radiation with a concentration coefficient of 100...1000. High concentration factors are most easily achieved using a Fresnel lens. To cool photovoltaic elements, it is recommended to use thermal energy and an active cooling system. In this regard, the task was set to develop an experimental device with a solar energy concentrator based on Fresnel lenses.

Key words: *parabolic trough concentrator; linear concentrator; polyvinyl chloride; analogue-digital converter; transistor-transistor logic; universal synchronous-asynchronous receiver-transmitter; band gap of a semiconductor; average temperature of the coolant in the tube; angular displacement of the Earth in orbit.*

Many foreign research and production companies have been working on prototypes of photovoltaic power plants with high concentration factors for the past 20 years and are testing large enough power plants based on them. Active development of concentrated photovoltaic power plants began in 1976 at Sandia National Laboratories (SNL) - USA. Their first devices could direct the sun in two axes, including concentrators based on Fresnel lenses, and had a degree of concentration. Such photocells show good results when operating at a light flux with a concentration factor of up to 20.

Methods of obtaining. The basic principle of concentrating photovoltaic systems is to use optics to focus sunlight onto a small photocell [6]. Thus, it was shown that the solar cell area can be reduced by a factor equal to the concentration factor and the radiation intensity can be increased by the same factor.

$$A_{pv} = A_c \frac{I_o}{Ic}$$

A_{pv} - absorber (photocell) active surface area, m^2;

A_c - hole area of the concentrator, m^2;

I_0 - the intensity of solar radiation on a surface perpendicular to the direction of unconcentrated sunlight, W/m^2;

I_c - concentrated solar energy flux density, W/m^2;

REFERENCES

1. Knysh L.I. Quyosh batareyasining harorat rejimini o'rganish, uni konsentrlangan quyosh nurlari oqimi bilan isitishning notekisligini hisobga olgan holda // Alternativ energiya va ekologiya, № 1-2 (118), 2013. P. 31-34.
2. Anatichuk L.I., Mochernyuk Yu.M. "Quyoshli issiqlik generatori va elektr", UA 73624 U, 2021 yil.
3. Li G., Shi X., Fu C. va Zhou G. Quyoshni kuzatish texnologiyasiga asoslangan yangi MPPT kontrollerini loyihalash va amalga oshirish // Elektr mashinalari va tizimlari, ICEMS 2008. Xalqaro konferentsiya. 2008.bet. 2611 – 2615.

STUDY OF THE EFFECT OF MECHANICAL PRESSURE ON THE OUTPUT PARAMETERS OF SILICON-BASED SOLAR PANELS

Sevarakhon Bakirova[1], Azizjon Kurbanov[2]

Andijan State University,
129 University str., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99894) 867-81-67, e-mail: sbakirova471@gmail.com

In the second half of the 20th century, semiconductor materials shifted from being the subject of intensive research to being used in a wide range of practical applications. These materials, particularly in the fields of electronics, microelectronics, radio engineering, automation, telemechanics, robotics, and energy, are now widely utilized. The aim of these advancements is to create new types of microelectronic tools that are smaller in size, more energy- and resource-efficient, and reliable while ensuring fast performance [1].

With the widespread adoption of photovoltaic energy sources as alternative energy solutions, new practical challenges have emerged in areas that were previously not given significant attention. One such challenge is the mechanical stresses exerted on solar cells and panels by external environmental factors, which have been observed to significantly reduce their output parameters. This issue has highlighted the need for scientific research to address the problem and its practical implications [2].

This study focuses on the effect of mechanical pressure on solar panels by comparing panels subjected to pressure with those that are not. Their photoelectric properties are examined and analyzed as shown in Figure 1.

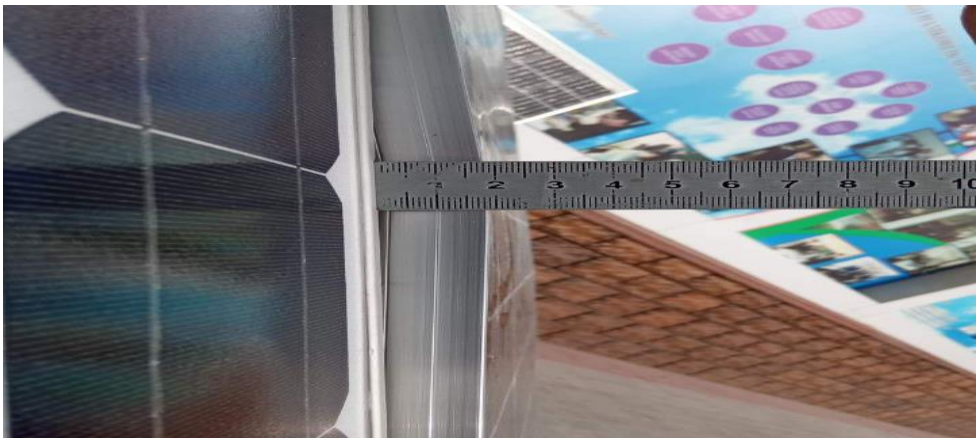


Figure 1. Comparison of Solar Panels with and without Mechanical Pressure: Deformation and Broken Glass Coating on a 200 W Panel

Under mechanical pressure, the top glass cover of the 200 W solar panel was found to break and bend. The external temperature was measured at 28°C, while the panel temperature was 41°C. The light intensity was 517 W/m² (35 Lux), and the voltage-current characteristics of the panel are presented in Figures 2 and 3.

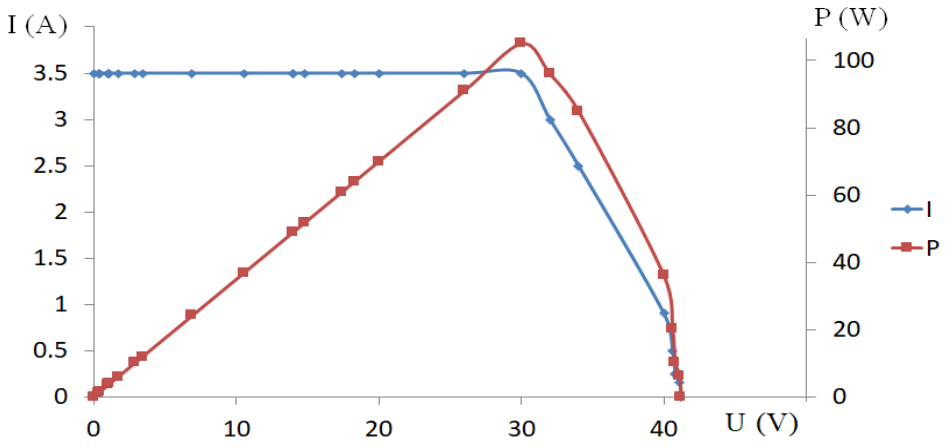


Figure 2. Solar Panel Under Normal Conditions (No Mechanical Pressure) I-V Characteristics

The voltage-current (I-V) characteristic is important in determining several key parameters of the panel's performance, such as maximum current (I_max), maximum voltage (V_max), open-circuit voltage (V_oc), short-circuit current (I_SC), and its efficiency (η).

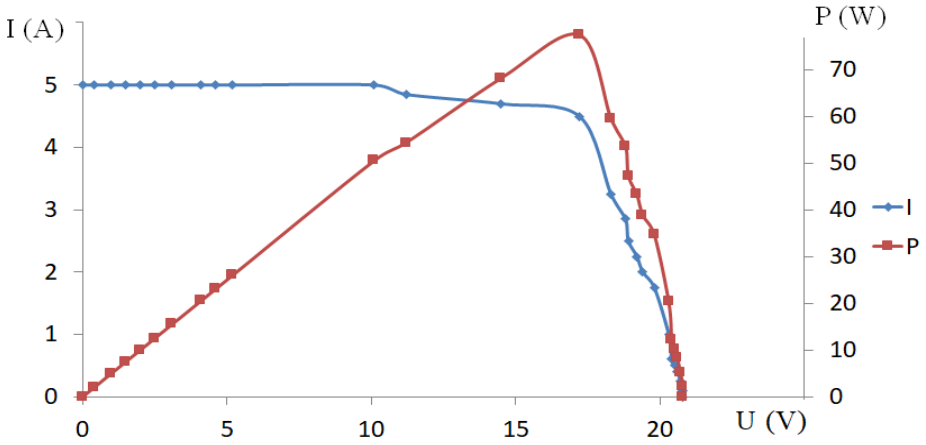


Figure 3. Solar Panel Under Mechanical Pressure V-A Characteristics

As seen in Figure 3, when the panel is subjected to mechanical pressure, the photoelectric features are significantly worse than those of the panel without pressure (Figure 2). This degradation is particularly evident when external forces cause the glass cover to break and the panel to bend. Despite these issues, the solar panel can continue to operate, albeit at a reduced efficiency. It is important to highlight that external mechanical forces, such as bending or breaking the top glass cover, lead to a decrease in the overall performance of the solar panel, regardless of the possibility of continued operation.

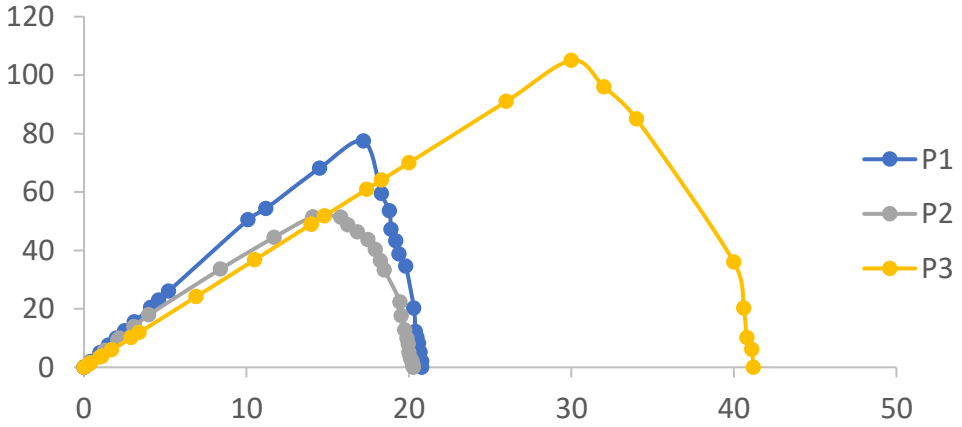


Figure 4. The power graphs of the solar panels, which were subjected to mechanical pressure, showed bending of the profile without any deformation

Conclusion:

Mechanical pressure has a significant negative impact on the performance of silicon-based solar panels, leading to a decrease in their output parameters. The degradation of photoelectric characteristics due to the bending and breaking of the glass cover is evident. Further research is necessary to explore ways to mitigate these effects and improve the durability and efficiency of solar panels under mechanical stress.

REFERENCES

1. S. Bakirova, "Study of the Effect of Mechanical Pressure on Silicon-Based Solar Cells."
2. B. Rashidov, "Impact of Local Mechanical Stress on the Photoelectric Characteristics of Basic p-n Structures in Silicon".

OPTICAL PROPERTIES OF MONOFACIAL AND BIFACIAL SOLAR CELL USING SENTAURUS TCAD SOFTWARE

R. Aliev[1], M. Komilov[1], S. Aliyev[2]

Andijan State University, Andijan State Technical University
129 University str, Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99893) 257-80-27, e-mail: komilovmdotcom94@gmail.com

Abstract: *The main task of this scientific research work is the effective use of solar energy, one of the renewable energy sources. Accordingly, this is intended to be achieved by creating a reflective layer in simple solar cells and bifacial solar cells. According to the results, it was found that the current density reached 28 mA/cm2 for the bifacial solar cell and 22 mA/cm2 for the simple solar cell. To achieve the shown result, SiO2 was adopted as the anti-reflection layer for both types of solar cells, and this was coated on the sample surface at a thickness of 100nm.*

Key words: *silicon, Sentaurus TCAD, monofacial solar cell, bifacial solar cell.*

ORCID: [1]0009-0006-2080-3371

Science and manufacturing industry are developing rapidly worldwide. This situation has led to an increase in the demand for energy in all countries. Since energy resources are limited in nature, it is convenient and effective to use renewable energy sources. In particular, the use of solar energy is very promising. The conversion of solar energy into electricity is carried out through solar panels. The main 95% of solar panels are made of silicon material [1]. Solar panels convert light energy into electricity, so it is necessary to study their optical processes. For a long time, a simple solar cell has been used, but now the use of bifacial solar cells is highly effective. Bifacial solar cells receive more light than simple solar cells. Simple solar cells receive light from one side, while two-sided sensitive solar cells also receive diffusely scattered light due to the presence of the Earth's albedo [2]. This research paper aims to improve the efficiency of single-sided and double-sided photosensitive solar cells by coating them with an anti-reflection layer. For this, calculations were performed by modeling single-sided and double-sided photosensitive solar cells with a thickness of 20 µm using the Sentaurus TCAD software.

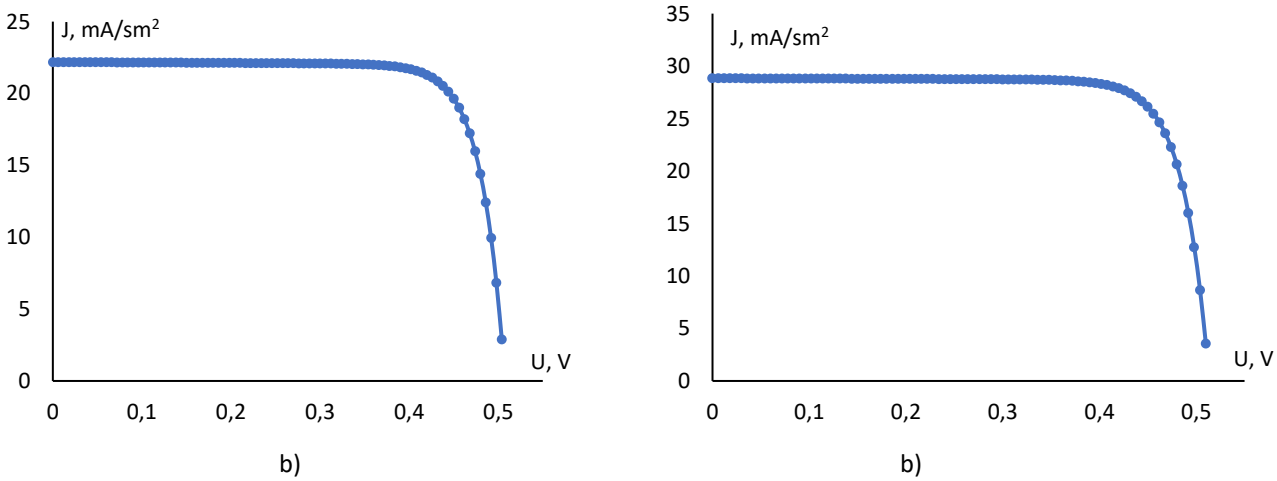


Fig 1. I-V character of a) simple solar cell, b) bifacial solar cell

From Fig 1-a, it can be seen that a short-circuit current density of 22 mA/cm^2 was achieved for a simple solar cell. From Fig 1-b, bifacial solar cells 28 mA/cm^2 was achieved. The results show that the bidirectionally sensitive solar cell has achieved higher efficiency than the conventional solar cell. This experiment was achieved by exposing both types of solar cells to direct light. In the future, it is planned to conduct research on the bidirectionally sensitive solar cell under different light exposures.

REFERENCES

7. William Shockley and Hans J Queisser, Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells, Journal of Applied Physics Vol 32, DOI: 10.1063/1.1736034.
8. Ersagun Türkdoğru, Mahir Kutay, Analysis of albedo effect in a 30-kW bifacial PV system with different ground surfaces using PVSYST software, Journal of Energy Systems, DOI: 10.30521/jes.1105348

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF 100 KW SOLAR PHOTOELECTRIC SYSTEMS CONNECTED TO THE GRID AT THE FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING OF THE ANDIJAN STATE TECHNICAL INSTITUTE

Nodirbek Topvoldiyev[1], Suxrob Aliyev[2]

Andijan State Technical Institute
56 Baburshok str, Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99890) 147-48-46, e-mail: n.topvoldiyev95@gmail.com

Abstract: *This study evaluates the efficiency and performance of a 100 kW on-grid solar photovoltaic system installed at the Faculty of Electrical Engineering, Andijan Mechanical Engineering Institute, based on data collected from January to December 2024. The system generated 96,974.04 kWh annually, influenced by the region's solar radiation intensity of 1600–1700 kWh/m².*

Key words: *Solar photovoltaic system, energy efficiency, economic analysis, environmental impact.*

ORCID: [1] 0000-0003-1895-8519

The 100 kW on-grid solar photovoltaic system installed at the Faculty of Electrical Engineering of Andijan State Technical Institute generated a total of 96,974.04 kWh of electricity in 2024 Figure 1. This system was implemented to partially cover the institute's electricity demand and reduce the negative impact on the environment through the use of renewable energy sources. In Uzbekistan, about 220 out of 365 days are sunny. In the summer months, the energy production capacity of solar power plants reaches its maximum. Andijan is one of the sunniest regions of Uzbekistan, with significant variations in solar radiation and temperature throughout the year. These variations directly affect the efficiency of solar photovoltaic systems. Below is an analysis of monthly temperature and solar radiation changes based on data for 2024.

The following monthly average temperatures are expected in Andijan in 2024:

Winter (January-February): Temperatures range from -2°C to +4°C, with low solar radiation (60-80 kWh/m²).

Spring (March-May): Temperatures range from +10°C to +22°C, with moderate solar radiation (120-160 kWh/m²).

Summer (June-August): Temperatures rise to a maximum of +32°C, with solar radiation reaching its highest level (180-210 kWh/m²).

Autumn (September-November): Temperatures gradually drop from +25°C to +10°C, with solar radiation varying between 100-150 kWh/m².

December: Temperatures hover around +3°C, with solar radiation dropping again (70-90 kWh/m²).

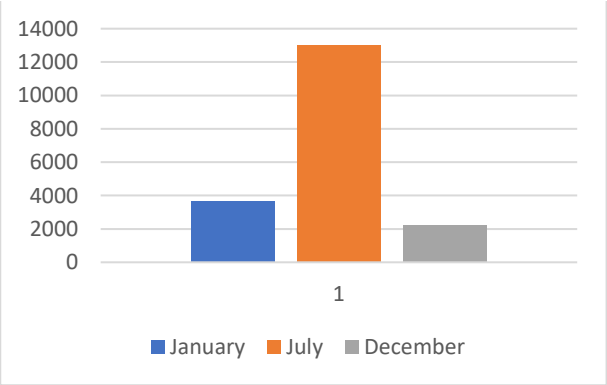


Fig. 1. Electricity generated in 2024 by a 100 kW on-grid solar photovoltaic system installed at the Faculty of Electrical Engineering of Andijan State Technical Institute

Solar radiation reaches its highest point of the year in June (200+ kWh/m²). Radiation levels are stable and moderately high in spring and autumn. Solar panel production efficiency decreases in winter due to lower solar radiation.

Solar photovoltaic systems show their efficiency depending on the ambient temperature and solar radiation. Despite the high temperature in the summer in Andijan, the maximum solar radiation increases energy production. However, high temperatures can in some cases slightly reduce the efficiency of the panels. In the winter months, energy production drops to a minimum due to low solar radiation [2].

REFERENCES

1. Raxmatov, I., Samiyev, K., & Mirzayev, M. (2024). Analysis of the efficiency of a 300 kW solar photovoltaic system in the climate of Uzbekistan. BIO Web of Conferences, 84, 05020. https://doi.org/10.1051/bioconf/20248405020
2. Ayora, E., Munji, M., Kaberere, K., & Thomas, B. (2023). Performance analysis of 600 kWp grid-tied rooftop solar photovoltaic systems at Strathmore University in Kenya. Results in Engineering, 19, 101302. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101302

EFFICIENT PHOTOCELLS BASED ON SILICON WITH GE_XSI_{1-X}-SI HETEROSTRUCTURES

N. Zikrillaev, F. Urakova, M. Shoabdurakhimova, A. Sattorov

Tashkent State Technical University, 100095 Tashkent, Uzbekistan,
tel:(90) 826-78-82, e-mail: feruzaxonurakova@gmail.com

Impurity atoms of germanium lead to a change in the band gap width of the original silicon due to the formation of Ge_xSi_{1-x}-Si heterostructures, which is one of the fundamental parameters of the material. This, in turn, results in an expansion of the spectral sensitivity range, which is characteristic when developing efficient solar cells with a wide solar radiation absorption range.

Key words: *silicon, germanium, diffusion, photocell, concentration, heterostructure, photoenergetics, binary compounds.*

ORCID: 0000-0002-6696-5265, 0000-0001-5831-4019, 0000-0002-1879-6751, 0009-0003-0645-3051

Currently, many studies are being conducted by scientists and specialists on the use of alternative energy sources for electricity generation, especially solar energy. The large-scale use of solar energy in all sectors of the national economy is mainly determined by the efficiency, reliability, and cost-effectiveness of the developed solar cells. Improving the efficiency of silicon-based solar cells (SC) is a very important parameter; therefore, a comprehensive study of the electrophysical parameters of SC is required [1-4]. One of the ways to address this problem is to stabilize the operating parameters of solar cells against external influences such as temperature and radiation, which helps extend their service life by additionally doping the base material with impurity atoms [5-7]. Currently, the efficiency of existing monocrystalline silicon-based solar cells has reached approximately 20% on an industrial scale and about 25% in laboratory conditions, with ongoing research aimed at increasing their efficiency.

In this regard, the study of additional doping of silicon with isovalent and rare-earth elements is of great interest. From the analysis of the literature data, it has been established that silicon doped with impurity atoms of these elements not only retains its original electrophysical parameters but can also significantly increase the lifetime of minority charge carriers, which contributes to improving the efficiency of solar cells (SC) [8,9]. In recent years, researchers have been studying silicon with binary compounds for the creation of SCs. In this regard, the development of SCs based on monocrystalline silicon diffusion-doped with germanium impurity atoms is of particular interest.

Based on the developed two-stage diffusion doping technology with germanium impurity atoms, Ge_xSi_{1-x}-Si heterostructures were obtained on the surface and near-surface layer of silicon using the gas-phase diffusion method. The potential for their wide application in electronics, particularly in nanotechnology and solar energy, has been demonstrated [10]. Thanks to the unique properties of silicon doped with germanium impurity atoms, which form binary compounds such as Ge_xSi_{1-x}, it is possible to create devices and instruments that surpass existing ones in terms of their performance characteristics. According to the literature, binary compounds of Ge_xSi_{1-x} in silicon are mainly obtained by gas-phase or liquid-phase epitaxy methods. However, these methods do not allow for the formation of a solid solution on the silicon surface with the required and reproducible thickness and a specific elemental composition. The main drawback of these methods is that they do not enable the creation of nanoscale structures of binary compounds based on germanium impurity atoms on the surface and within the crystalline lattice of silicon.

To develop the technology for obtaining and studying the parameters of solar cells, initial monocrystalline silicon of grades KDB-0.5 and KEF-100, grown by the Czochralski method (Cz-Si), with resistivity of 0.5 and 100 Ohm·cm, respectively (the initial boron and phosphorus concentrations being ~10^{15} cm^{-3} and ~10^{13} cm^{-3}). The diffusion of germanium impurity atoms was carried out under specific conditions using a low-temperature two-stage diffusion technology. The developed technology of low-temperature diffusion consists of the following: the studied initial samples of silicon and germanium diffusant with a certain mass (determined by the volume of the quartz ampoule) are placed in evacuated quartz ampoules (the vacuum in the ampoule should be within the range of P ~10^{-6} mmHg). The prepared ampoules were placed in a diffusion electric furnace of the MG17–60/300 model at a temperature of T = 30°C. The temperature of the electric furnace with the quartz ampoules was gradually increased at a rate of 5°C/min. During this process, the samples are heated to the temperature of the first diffusion stage, which is in the range of T = 600÷650°C, and maintained at this temperature for t = 10÷30 minutes. Then, the temperature of the electric furnace is rapidly increased (150÷200°C/min) to the temperature of the maximum solubility of germanium impurity atoms (T = 1100÷1250°C), and the samples are held at this temperature for t = 3 hours. Afterwards, the quartz ampoules are removed from the furnace and cooled at a rate of 200°C/sec.

For the fabrication of silicon-based solar cells with Ge_xSi_{1-x}-Si heterostructures, two different technological modes were used (Fig. 1). In the first technological mode, the p-n junction was formed by introducing phosphorus impurity atoms into the initial KDB-0.5 silicon at a diffusion temperature of T = 1050°C and a duration of t = 3 hours. In the second technological mode, the diffusion of boron impurity atoms into the initial KEF-100 silicon was carried out at a temperature of T = 1150°C and a duration of t = 3 hours. The current-collecting contacts of metallic films on the surface and backside of the solar

cells were formed using the thermal evaporation method of nickel metal layers in a vacuum. As an antireflection coating on the surface of the solar cells, a silicon dioxide (SiO_2) layer with a thickness of up to ~1000 Å was applied. The solar cells were fabricated in a square shape with dimensions of 2×2 cm². Figure 1 shows the main technological modes and the structure of the obtained silicon-based solar cells with Ge_xSi_{1-x}-Si heterostructures.

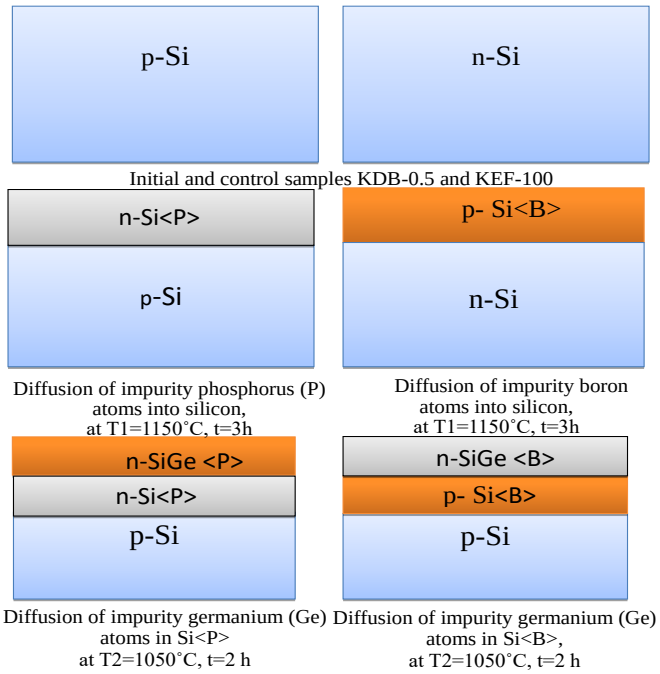


Fig. 1. Technological modes for obtaining a p-n junction based on silicon with Ge_xSi_{1-x}-Si heterostructures

The elemental composition of silicon after the diffusion of germanium impurity atoms was studied using a Mira Tescan X-ray energy-dispersive microanalyzer. The obtained research results revealed that the distance between silicon and germanium atoms depends on the composition of the formed Ge_xSi_{1-x} binary compounds in the silicon crystal lattice, which leads to changes in the electrophysical parameters without disrupting the original silicon crystal lattice.

The analysis of the obtained research results established that silicon with Ge_xSi_{1-x} binary compounds is a promising material for photovoltaic applications. The sensitivity of the solar cells produced using the developed technology extends the absorption spectrum of the fabricated cells into the infrared (IR) region of the solar radiation spectrum. This expansion of the absorption spectrum leads to an increase in the efficiency of silicon-based solar cells with Ge_xSi_{1-x}-Si heterostructures.

REFERENCES

1. F. Priolo, T. Gregorkiewicz, T. Galli, T.F. Krauss. Nat. Nanotechnol. 9, 19-26 (2014).
2. Í. Ramiro, A. Martí, E. Antolín, A. Luque. IEEE J. Photovolt. 4, No 2, 736–748 (2014).
3. Y.Okada, N.J. Ekins-Daukes, T. Kita, R. Tamaki, M. Yoshida, A. Pusch, O. Hess, C.C. Phillips, D.J. Farrell, K. Yoshida. Appl. Phys. Rev. 2, No 021302, 11 -15 (2015).
4. W. Yang, J. Mathews, J. Williams. Mat. Sci. Semicon. Proc. 62, No 25, 103–114, (2017).
5. W. Yang, S.Q. Lim, J.S. Williams. In Laser Annealing Processes in Semiconductor Technology. 8, 4-6, (2021).
6. Z.T. Kenzhaev, N.F. Zikrillaev, V.B. Odzhaev, K.A. Ismailov, V.S. Prosolovich, Kh.F. Zikrillaev, S.V. Koveshnikov. Russ. Microelectron. 53, 105–116, (2024).
7. Z.T. Kenzhaev, N.F. Zikrillaev, K.S. Ayupov, K.A. Ismailov, S.V. Koveshnikov, T.B. Ismailov. Surf. Engin. Appl. Electrochem. 59, 858–866, (2023).
8. Z.T. Kenzhaev, Kh. M. Iliev, K.A. Ismailov, G. Kh. Mavlonov, S.V. Koveshnikov, B.K. Ismaylov, S.B. Isamov. Phys. sci. technol. 11, No 1-2, 13-22, (2024).
9. M.K. Bakhadyrkhanov S.B. Isamov, Z.T. Kenzhaev, S.V. Koveshnikov. Tech. Phys. Let. 45, No 10, 959–962, (2019).
10. G.A. Kushiev, B.O. Isokov, U.X. Mukhammadjonov. J. Nano- Electron. Phys.16, No 3, 03003, 4, (2024).

УДК 620.92

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БАЛАНСУ СОНЯЧНОЇ УСТАНОВКИ З ВІЛЬНИМ РЕЖИМОМ ТЕПЛООБІНУ ТА ЕЛЕКТРОСТИМУЛЯТОРОМ ЦИРКУЛЯЦІЇЇ ТЕПЛОНОСІЯ НА ВИХОДІ

В. М. Головко[1, 2], В. Г. Володарський[2]

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.
Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Г. Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна, тел./факс: +38(044)206-28-09, t-mail: www.ive.org.ua

У роботі наведені результати аналізу енергетичного балансу сонячної установки, що функціонує у вільному режимі теплообміну з використанням електростимулятора циркуляції теплоносія на виході. Досліджено вплив основних параметрів, як-от інтенсивність сонячного випромінювання, температура навколишнього середовища та швидкість циркуляції теплоносія, на ефективність роботи системи. Встановлено, що застосування електростимулятора забезпечує стабільність руху теплоносія, покращує теплообмін.

Ключові слова: *сонячна установка, стимулятор, циркуляція теплоносія, нагрівач*

ANALYSIS OF THE ENERGY BALANCE OF A SOLAR INSTALLATION WITH A FREE HEAT CYCLE MODE AND AN ELECTRIC CIRCULATION STIMULATOR HEAT TRANSFER AT THE OUTLET

V. Golovko[1, 2], V. Volodarskyi[2].

National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Peremogy Ave., Kyiv, 03056.
Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine, str. G. Hotkevicha, 20A, Kyiv, 02094, Ukraine, phone/fax: +38(044)206-28-09, t-mail: www.ive.org.ua

The paper presents the results of the analysis of the energy balance of a solar installation operating in the free mode of heat exchange using an electric stimulator of the circulation of the heat carrier at the outlet. The influence of the main parameters, such as the intensity of solar radiation, the temperature of the environment and the circulation speed of the heat carrier on the efficiency of the system, has been studied. It was established that the use of an electric stimulator ensures the stability of the movement of the heat carrier and improves heat exchange.

Key words: *solar installation, stimulator, circulation of the heat carrier, the heater*

ORCID: 0000-0003-0195-9654; 0009-0002-6133-2298;

Сонячні водонагрівальні установки з вільним режимом теплообміну широко застосовуються для перетворення сонячної енергії на теплову з метою підігрівання теплоносія. Основною перевагою таких систем є відсутність насосного обладнання, що забезпечує енергонезалежність та відносну високу надійність. Проте через залежність швидкості циркуляції від температурного градієнта робота цих установок може бути нестабільною. Зокрема, за зміни умов зовнішнього середовища або інтенсивності сонячного випромінювання можлива поява термічної інерції, локального перегріву колектора та зменшення ефективності передачі енергії.

Ефективність сонячних теплових установок здебільшого визначається енергетичним балансом системи, включно з надходженням, передачею, накопиченням і втратою теплової енергії. Особливий інтерес викликають установки з вільною циркуляцією теплоносія, де основним рушієм потоку виступає різниця густини рідини за зміни температури. Уповільнення циркуляції призводить до локального перегріву в зоні колектора, що збільшує випромінювальні втрати теплоти і може спричинити утворення парових пробок, що ще більше ускладнює роботу системи.

Використання додаткових стимуляторів циркуляції дозволяє підвищити продуктивність таких систем, для активації потоку теплоносія та зменшення теплової інерційності системи. Одним з ефективних варіантів реалізації такого стимулятора є локальний нагрівач, розташований на виході з колектора. Це рішення дає змогу підсилити рушійний тиск природної циркуляції, створюючи додатковий градієнт температури між виходом і входом теплообмінного контуру.

Дослідження енергетичного балансу такої системи є важливим для визначення ефективності взаємодії між сонячним колектором, теплоносієм, стимулятором циркуляції та накопичувальним баком.

Головним завданням аналізу є оцінка:
- зміни швидкості циркуляції при різних режимах роботи стимулятора;
- частки теплової енергії, що ефективно передається в бак, і тієї, що втрачається через випромінювання та конвекцію;
- раціональних умов роботи нагрівача.

Методика дослідження включає оцінку потоків енергії в кожному елементі системи, а також визначення енергетичних втрат і ефективності перетворення сонячної енергії при нагріванні теплоносія. Використання електростимулятора циркуляції дозволяє не лише стабілізувати роботу системи, а й збільшити ККД усієї установки за рахунок забезпечення збалансованого розподілу енергії між колектором і накопичувальним баком.

Отже, це дослідження спрямоване на розробку й аналіз доцільної конфігурації сонячної установки з урахуванням енергетичних потоків, теплових втрат і впливу додаткового стимулятора циркуляції на ефективність роботи системи.

Аналіз енергетичного балансу включає оцінку потоку енергії в кожному елементі системи:
- сонячний колектор – приймає сонячну енергію та передає її теплоносію, враховуючи поглинання, відбиття і втрати через випромінювання та конвекцію;
- система циркуляції – забезпечує переміщення теплоносія між колектором і накопичувальним баком, причому швидкість потоку визначає інтенсивність теплопередачі;
- електростимулятор циркуляції – виконує функцію локального джерела нагрівання, що підвищує градієнт температури та посилює природну циркуляцію;
- тепловий акумулятор – забезпечує накопичення й подальше використання отриманої енергії з урахуванням теплових втрат через стінки бака та теплоізоляцію.

У сонячних установках з вільною циркуляцією потік теплоносія визначається виключно температурним градієнтом між виходом і входом колектора. Відсутність примусового переміщення рідини робить систему чутливою до коливань сонячної радіації, що може спричинити:
- низьку швидкість циркуляції в ранкові та вечірні години, що зменшує теплопередачу від колектора до теплоносія;
- перегрівання теплоносія у верхніх шарах колектора за слабкої циркуляції, що підвищує теплові втрати через випромінювання;
- нестабільність роботи системи через зміни температурного градієнта та нерівномірний розподіл енергії.

Нагрівач, розташований на виході з колектора, відіграє роль стимулятора циркуляції. Його робота ґрунтується на локальному підвищенні температури теплоносія, що створює додатковий градієнт густини. Це дозволяє:
- збільшити швидкість циркуляції, що забезпечує рівномірніше нагрівання теплоносія та зменшення втрат енергії в системі;
- знизити ймовірність утворення парових пробок, що можуть виникати за слабкого руху теплоносія;
- підвищити теплову ефективність акумулювального бака завдяки кращому розподілу нагрітої рідини.

Ефективність роботи сонячної установки з локальним електростимулятором циркуляції залежить від режиму його вмикання. Важливо розробити відповідний алгоритм управління, що передбачає:
- адаптивне регулювання потужності нагрівача залежно від рівня сонячного випромінювання та поточної швидкості циркуляції;
- систему зворотного зв’язку, яка враховує зміну температури теплоносія в різних точках системи для корекції режиму нагрівання;
- приєднання нагрівача до сонячної батареї, що забезпечує автономну роботу без споживання енергії від зовнішніх джерел.

Висновки

Проведено аналіз енергетичного балансу сонячної системи з вільним режимом теплообміну з додатковим локальним електростимулятором циркуляції теплоносія.

Встановлено, що швидкість циркуляції обмежується ймовірністю утворення парових пробок, що виникають за слабкого руху теплоносія, і може бути підвищена за рахунок додаткового локального нагрівання на виході з колектора.

Підвищення градієнта густини теплоносія за рахунок додаткового стимулятора підвищує швидкість його потоку.

УДК 637.5.02

ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ У БАЛАНСІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

П. Д. Лежнюк[1], Т. О. Лиса[2]

Вінницький національний технічний університет,
вул. Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, Україна,
тел. +380677056138; +380680582522
e-mail: lezhpd@gmail.com; tanyastyskal@ukr.net

Оскільки ФЕС займають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС), то важливо знати, яку кількість електроенергії та за яким можливим графіком у часі ФЕС можуть її генерувати. Крім інсоляції сонця іншою причиною несталого генерування ФЕС є їх технічний стан, зокрема поступова деградація ФЕМ.

Ключові слова: *фотоелектричний модуль, залишковий ресурс, деградація, технічний стан.*

IMPACT OF PHOTOELECTRIC MODULE DEGRADATION ON THE ELECTRICITY BALANCE OF LOCAL ELECTRICITY SYSTEMS

P. Lezhniuk, T. Lysa

Vinnytsia National Technical University,
95 Khmelnytskyi Highway, Vinnytsia, Ukraine,
tel. +380677056138; +380680582522
e-mail: lezhpd@gmail.com; tanyastyskal@ukr.net

Since PV plants occupy a prominent place in the power and electricity balance of electric power systems (EPS), it is important to know how much electricity and on what possible schedule in time PV plants can generate it. In addition to solar insolation, another reason for unstable generation of PV plants is their technical condition, in particular, the gradual degradation of the PV module.

Keywords*: photovoltaic module, residual resource, degradation, technical condition.*

ORCID; 0000 0002 9366 3553[1]; 0009-0004-8422-7778[2]

На сьогодні відновлювані джерела енергії (ВДЕ), зокрема ФЕС, посідають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС).

Оскільки на вироблену кількість електроенергії ФЕС впливають не тільки погодні умови, що очевидно, але й технічний стан їх обладнання, то для забезпечення надійності електропостачання необхідно його перевіряти й прогнозувати виникнення несправностей, планувати заміни пошкодженого обладнання та його відновлення. Особливе місце тут займають фотоелектричні модулі (ФЕМ), для яких природним є зменшення їх продуктивності (деградація) з часом [1, 2].

Тобто постає задача підтримки енергоефективності установок, що гарантуватиме очікуваний рівень генерування електроенергії, при цьому також існує необхідність контролю їх роботи, щоб уникнути можливих відключень, які можуть спричинити понаднормове відхилення планового значення генерування від поточного. Для розв'язку поставленої задачі розроблений програмно-апаратний комплекс для моніторингу, класифікації та виявлення несправностей (пошкоджень) роботи ФЕС та ідентифікація її технічного стану з урахуванням ретроспективних даних.

Запропонований метод передбачає два етапи.

1. Моделювання, в ході якого складається математична модель процесу функціонування ФЕС на основі ретроспективних даних про їх роботу з визначенням зони нечутливості та формування нейро-нечіткого алгоритму генерування.

2. Процес моніторингу та прогнозування з метою виявлення й діагностування появи дефектів або несправностей, при якому система працює в режимі реального часу, контролюючи технічний стан ФЕМ.

У разі невідповідності поточного значення ретроспективному й розрахунковому робиться висновок про необхідність додаткових досліджень, а саме розрахунок коефіцієнтів-індикаторів для локалізації області пошуку пошкодженої панелі, оскільки не кожен виявлений на попередньому кроці дефект впливає на ефективність функціонування ФЕС. Визначається також коефіцієнт залишкового ресурсу, що дозволяє ідентифікувати стан панелі та спрогнозувати розвиток дефекту.

Програмне забезпечення оцінювання технічного стану ФЕС. Аномальну роботу ФЕМ у стрінгу пропонується оцінювати за допомогою коефіцієнтів-індикаторів, які вказують на наявність проблеми в його роботі. За результатами

аналізу експериментальних даних, отриманих за допомогою ПАК, визначаються вольт-амперні характеристики (ВАХ) і коефіцієнти залишкового ресурсу ФЕМ. При цьому враховується чутливість цих характеристик ФЕМ до зміни метеорологічних факторів, що контролюються.

На рис. 1 показано приклади пошкоджень на ФЕМ, які виявлені за допомогою розробленого програмно-апаратного комплексу.

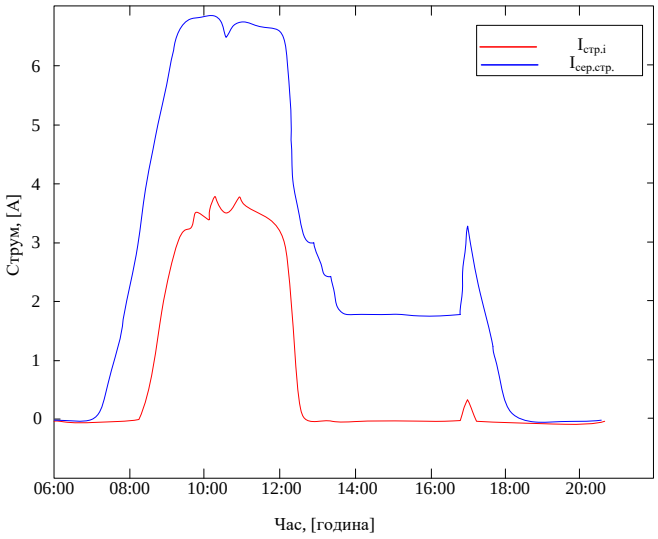


Рис. 1. Несправності давача струму

Питання щодо подальшої експлуатації ФЕМ вирішується за значеннями їх коефіцієнтів залишкового ресурсу. Оскільки пошкодження кожного з вузлів ФЕМ призводить до погіршення функціонування всього ФЕМ, то коефіцієнт загального залишкового ресурсу (КЗР) знаходять за виразом [3] :

$$k_{рес} = \prod_{j=1}^{d} k_j^{p_j} \qquad (1)$$

де k_j – коефіцієнт залишкового ресурсу ФЕМ по j-му діагностичному параметру;
d – кількість діагностичних параметрів;
$p_j = n_j / m$ – імовірність відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра;
n_j – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю j-го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення,
m – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

Для створення математичної моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ФЕМ використано параметри, за кожним з яких можна робити висновок про стан ФЕМ. Жоден з цих параметрів не характеризує повною мірою технічний стан, він лише вказує на певні зміни технічного стану ФЕМ, що призводять до зменшення їх продуктивності.

Отже, з впровадженням процедури відшкодування гарантованому покупцю частки вартості небалансів електричної енергії для всіх виробників ВДЕ питання стабільного генерування є актуальним. Достовірне прогнозування генерування ФЕС неможливе без визначення їх технічного стану та врахування деградації ФЕМ під час їх експлуатації.

ПОСИЛАННЯ

1. Kim, J.; Rabelo, M.; Padi, S. P.; Yousuf, H.; Cho, E.-C.; Yi, J. A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy, Energies 2021, 14, 4278. https://doi.org/10.3390/en14144278

2. M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle, Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 159, 2022, 112160, ISSN 1364-0321

3. Lezhniuk P., Rubanenko O., Rubanenko O. Determination of Optimal Transformation Ratios of Power System Transformers in Conditions of Incomplete Information Regarding the Values of Diagnostic Parameters. Chapter of book: “Fuzzy Logic”. 2019. P. 97–124. doi: 10.5772/intechopen.84959.

УДК 621.393

ОСОБЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ ДВОСТОРОННІХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

В. С. Цих[1], А. М. Кульчак[1], А. В. Яворський[1]

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, Івано-Франківська область, Україна, 76000
тел.: (098) 727-03-34, e-mail: andrii.kulchak-ive221@nung.edu.ua, тел.: (097) 855-40-91,
e-mail: vitalii.tsykh@nung.edu.ua, тел.: (050) 373-18-63, e-mail: andrii.yavorskyi@nung.edu.ua

У публікації проведено аналіз основних досліджень щодо відбивальних матеріалів, які можуть використовуватись для підвищення ефективності роботи двосторонніх сонячних модулів.

Ключові слова: *двосторонні фотоелектричні модулі, ефективність, відбивачі, альбедо, двосторонній приріст енергії, генерація.*

FEATURES OF INCREASING THE EFFICIENTY OF OPERATION OF BIFACIAL PHOTOVOLTAIC MODULES

V. Tsykh[1], A. Kulchak[1], A. Yavorskyi[1]

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
15, Carpatska str., Ivano-Frankivsk, Ivano-Frankivsk region, Ukraine, 76000
phone: (098) 727-03-34, e-mail: andrii.kulchak-ive221@nung.edu.ua, phone: (097) 855-40-91,
e-mail: vitalii.tsykh@nung.edu.ua, phone: (050) 373-18-63, e-mail: andrii.yavorskyi@nung.edu.ua

The publication analyzes the main studies on reflective materials that can be used to improve the efficiency of bifacial solar modules.

Key words: *bifacial photovoltaic modules, efficienty, reflectors, albedo, bifacial energy gain, generation.*

ORCID: [1]0000-0002-9095-4099; [2]0009-0008-5241-1975; [3]0000-0002-5970-4286.

Розвиток концепцій екології та енергоефективності спричиняють потребу в розвитку сучасних енергоефективних відновлюваних технологій, яким якраз і відповідають сучасні двосторонні фотоелектричні модулі, ефективність яких потрібно збільшувати, що своєю чергою спричиняє потребу в наукових дослідженнях цієї проблеми. Адже двосторонні сонячні панелі характеризуються збільшенням потужності, використовуючи меншу площу земельної ділянки для їх встановлення, тому збільшується ефективність двосторонніх сонячних панелей. Розвиток використання двосторонніх сонячних панелей сповільнюється через високу вартість сонячних панелей з використанням двох сторін, складність монтажу та більшу вартість систем кріплення, які потрібно використовувати для їх встановлення.

Двосторонні фотоелектричні модулі (сонячні панелі) – фотоелектричні модулі, які використовують меншу площу для збільшення поглинання сонячного випромінювання, використовуючи дві сторони, де передня сторона поглинає пряме сонячне випромінювання, а зворотня відбите та/або розсіяне. Двосторонні фотоелектричні модулі (PV) за складом поділяються на дві частини – передня (фронтальна) сторона PV та зворотна (тильна) сторона PV. Двосторонні PV мають перевагу над односторонніми в тому, що можуть мати більшу ефективність завдяки більшому поглинанню сонячного випромінювання одночасно на двох сторонах PV.

Одним із варіантів підвищення ефективності використання PV-панелей є застосування спеціальних підстильних відбивальних покриттів. Розглянемо дослідження PV панелей з використанням підстильної відбивальної поверхні з матеріалом, який має різне альбедо. Альбедо є одним з основних параметрів, який потрібний для дослідження поверхонь з різних матеріалів, оскільки альбедо описує інтинсивність відбитого світла залежно від інтенсивності падаючого. Тому в роботі представлені різні дослідження зростання генерації електроенергії двосторонніми PV за рахунок використання матеріалів з більшим альбедо та їхній аналіз.

Альбедо поверхні залежить від кольору матеріалу, адже найкраще відбиває світло майже повного спектра поверхня білого кольору, а поверхня чорного кольору поглинає майже весь спектр випромінювання. Також альбедо відбивальної поверхні залежить від самого матеріалу, оскільки спектр випромінювання певного діапазону частот є різним для різних матеріалів. Детальніше дослідження щодо спектра різних матеріалів описано в [1]. Кожний матеріал можна охарактеризувати одним із двох параметрів: альбедо, та другим параметром, який є наслідком роботи фотомодулів при відбивальних матеріалах з різним альбедо – двосторонній приріст енергії, який характеризує виробництво електроенергії тильною стороною сонячної панелі відносно генерації одностороннім фотомодулем.

Біле агроволокно здатне підвищити генерацію двосторонніх PV в порівнянні з односторонніми на 12–16 %, якщо агроволокно розташоване прямо під сонячними панелями. Якщо чорне агроволокно розташовується під сонячними панелями по-різному, то двосторонній приріст енергії становитиме 8–10 %. Біло-зелене агроволокно підвищуватиме генерацію на 13 %. Якщо жоден матеріал не використовується, двосторонній приріст енергії прирівнюється до двостороннього приросту з використанням чорного агроволокна, тобто 8–10 %. Найбільшим двосторонній приріст буде для двосторонніх PV з використанням природнього білого відбивача, а саме снігу, який дозволяє збільшити енергію двосторонніх PV в порівнянні з односторонніми на 26–34 %, що істотно перевищує приріст енергії в порівнянні зі штучними білими відбивачами. Всі ці дані наведені в експериментальному дослідженні [2].

У дослідженні [3] наведені дані щодо використання відбивачів з інших матеріалів для тих самих параметрів роботи сонячних панелей з урахуванням різного альбедо, що досліджувалося британськими вченими. Було досліджено як відбивачі такі матеріали: біла плитка, білі камінці, бетон та ґрунт. Середнє альбедо для білої плитки становить 0,7–0,8, для білих камінців – 0,5–0,6, для бетону – 0,3–0,35, для ґрунту – 0,1–0,15. Використовуючи білі плитки для сонячних панелей, можна досягнути найвищого двостороннього приросту енергії – 14,3–25 %, для білих камінців двосторонній приріст залежно від розміру камінців може варіюватися від 2,8 до 22 %, для бетону залежно від складу він може становити від 2,4 до 18,6 %, а для ґрунту дослідження, пов’язані з вимірюванням двостороннього приросту енергії, не проводилися, для ґрунту проводилися дослідження з іншими параметрами та іншими залежностями. У цьому ж дослідженні визначалася ефективність сонячних панелей за допомогою лінійної залежності між генерацією електроененергії двосторонніми PV та загальним ефективним випромінюванням, де за встановленою залежністю визначався кутовий коефіцієнт, що дорівнював ефективності роботи сонячних панелей, який у цьому дослідженні становив 32 %.

У дослідженні [4] використовуються тільки два світловідбивальні матеріали – біла фольга та алюмінієві листи, покриті білою фарбою, що мають коефіцієнт відбиття понад 90 %. Не так багато матеріалів використовуються як відбивачі, оскільки це дослідження більше зосереджене на використанні різних нових технологій самого складу двосторонніх сонячних панелей. За допомогою фольги відбувається збільшення ефективності двосторонніх PV в порівнянні з односторонніми на 18 %. Білий дифузний відбивач, виготовлений з покритих білою фарбою алюмінієвих листів, який прикріплений до модулів, дозволяє підвищити ефективність двосторонніх PV площею 1,075 м^2 до 7,5 %, а ефективність двосторонніх PV з площею 0,536 м^2 підвищується до 12,1 %. Така різниця в ефективності для різних площ панелей є наслідком більшої площі модуля.

Дослідження [5] стосується вивчення підвищення ефективності двосторонніх PV за допомогою радіаційного охолодження з використанням відбивального покриття. Як відбивач використовується наноПАН-волокно, що складається з високоякісних полімерів, які мають хорошу відбивальну здатність. Особливо вона покращена в ближній інфрачервоній та ультрафіолетовій областях, внаслідок чого сонячно-зважена відбивальна здатність дорівнює 99 ± 0,5 %, що є досить високим значенням. Альбедо наноПАН прирівнюється до альбедо снігу. Використання наноПАН як рефлектора для двосторонніх PV дозволяє підвищити напругу холостого ходу, створеної модулем. Густина струму при використанні такої відбивальної системи збільшується від 3,93 до 6,42 мА/см^2.

Отже, можна зробити висновок, що для значного підвищення ефективності двосторонніх PV краще використовувати відбивальні поверхні модулів, і саме білого кольору. Найкращим серед білих матеріалів є наноПАН, який прирівнюється до природного білого снігу за відбивальними властивостями. Наступним кроком буде подальше практичне дослідження відбивальних матеріалів та оцінювання їх ефективності для двосторонніх сонячних панелей.

ПОСИЛАННЯ

1. Мальований М. О., Пилипенко О. В. Дослідження енергетичних рівнів напівпровідників. Метод ІЧ Спектроскопії: кваліфікаційна робота. Суми: Сумський державний університет, 2024. 33 с.
2. Юраш О. В., Гаєвський О. Ю., Дмитренко О. О. Робота двосторонніх фотоелектричних модулів в умовах затінення та різної відбиваючої поверхні: магістерська дисертація. Київ : КПІ ім. І. Сікорського, 2024. 148 с.
3. Performance analysis and comparison between bifacial and monofacial solar photovoltaic at various ground albedo conditions. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755008423000066 (дата звернення: 10.03.2025).
4. A Review of Different Types of Solar Cell Materials Employed in Bifacial Solar Photovoltaic Panel. URL: https://www.mdpi.com/1996-1073/16/8/3605 (дата звернення: 10.03.2025).
5. High albedo daytime radiative cooling for enhanced bifacial PV performance. URL: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/nanoph-2023-0611/html (дата звернення: 10.03.2025).

INVESTIGATION OF AN IMPROVED SOLAR COLLECTOR IN COMSOL MULTIPHYSICS

R. Aliev[1], A. Eraliev[2], M. Nosirov[1], N. Mirzaalimov[1], V. Abduazimov[1]

1Andijan State University, 129, Unversity str., Andijan, Uzbebistan
2Andijan state pedagogical institute, Do'stlik str. 4, Andijan, Uzbekistan, 170100
Phone: (+99890)-549-81-48, E-mail: nmz1964@yamdex.ru, mirzaalimov90@mail.ru

In the work, an improved solar collector was studied using the Comsol Multiphysics program, and the water movement velocity distribution, density distribution, and temperature distribution in its pipe were analyzed, and it was found that the improved solar collector is 8% more efficient than conventional collectors due to its new optimal design.

Keywords: *solar water collector, Comsol multiphysics, optimal design, temperature distribution, efficiency.*

ORCID: [1]0000-0002-7375-727X, [2]0009-0000-9318-4088, [3]0000-0002-9264-3710.

It is known that the solar energy industry is currently developing rapidly. This is due to the increasing demand for energy and the depletion of the main fossil fuels. Solar energy can be used using photovoltaic and thermal methods. In the thermal method, devices such as dryers, chillers, water desalination, and water heaters are used [1, 2].

Currently, hot water requirements are mainly met by using electric heaters and natural gas, and as a result, the cost of hot water is increasing. Rising energy prices, environmental problems, and the depletion of primary energy sources require less use of electric heaters. It is advisable to solve these problems by obtaining hot water without using electricity. For this, solar hot water supply systems can be widely used for domestic and commercial purposes.

In current solar collectors, part of the light energy falling on the collector surface (30-40%) is not used. This work discusses the development of an innovative technology for increasing the efficiency of a modern solar water heater by installing a light-reflecting base between the base and the pipes. In conventional solar water heaters, only the light falling on the pipes on the upper side of the device is used. In the device we propose, the light passing through the pipes is reflected by the base and falls on the lower side of the pipes. This helps to increase its efficiency (Fig. 1).

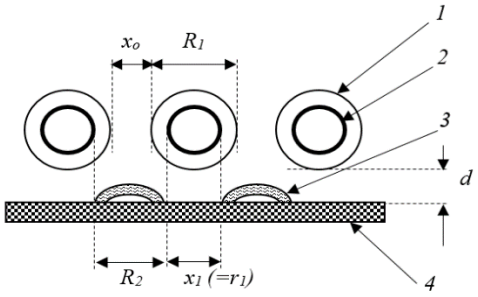


Fig. 1. Improved solar water heater. 1-Outer shell of the device pipe, 2-Inner shell of the device pipe, 3-Reflecting base

Solar collectors were studied in the "Comsol multiphysics" program. The results were obtained for the case where the pressure is 101330 Pa, the solar intensity on the collector surface is 1000 W/m^2, the inner radius of the pipe is 2 cm, and the length is 165 cm, the water velocity in the pipe is 0.0001 m/s, the water temperature at the entrance to the pipe is 293.15°K, and the calculation time is 17 min 48 s.

When studying the improved solar water heating collector created in the Comsol Multiphysics program, it was found that the new design developed is more efficient than the prototypes currently produced in the industry. By comparing the results obtained in the program with the experimental results determined in international scientific publications, the thermal parameters were compared and the results obtained through modeling were found to be consistent (calibration). It was found that the temperature, which is one of the most important parameters of the solar collector, differs by 4.8 °C in the Comsol Multiphysics program under the same conditions and at the same time. The modeling results obtained during the research showed that the proposed improved solar water heating collector is 8% more efficient than the solar water collectors produced in the industry due to its new optimal design under the same conditions.

REFERENCES

1. Thirugnanasambandam M., Iniyan S. and Goic R. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010, 14, 312-322.

2. Kannan N. and Vakeesan D. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 62 1092-1105.

УДК 621.311.25

МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ МОДЕЛІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО МОДУЛЯ ЗА КРИТЕРІЄМ РІЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

***М. М. Кузнєцов*[1]**

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна,
e-mail: renewable@ukr.net

Вибираючи модель фотоелектричного модуля для задач, пов'язаних з генерацією електроенергії, доцільно використовувати найпростішу модель, що забезпечує достатню точність. Пропонується метод спрощення моделі за критерієм річної генерації електроенергії.

Ключові слова: *фотоелектричний модуль, модель Simulink, генерація електроенергії.*

PHOTOVOLTAIC MODULE OPTIMISATION METHOD BASED ON ANNUAL ELECTRIC ENERGY YIELD

***M. Kuznietsov*[1]**

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
20A Hnata Hotkevycha str., Kyiv, Ukraine, 02094,
e-mail: renewable@ukr.net

When choosing a model of a photovoltaic module for tasks related to electricity generation, it is reasonable to use the simplest model that provides sufficient accuracy. The simplification method based on the criterion of annual electricity generation is proposed below.

Key words: *photovoltaic module, Simulink model, electric energy generation.*

ORCID: [1]0000-0002-0286-5652

Загальний підхід до моделювання електричних характеристик фотоелектричного модуля (ФЕМ) передбачає три головні елементи: джерело фотоелектричного струму I_{PV}, паразитний напівпровідниковий діод *D*, паралельний *Rsh* та послідовний *Rs* паразитні опори. Параметри елементів моделі розраховуються з характеристик модельованого ФЕМ, що зазвичай надаються виробником. Типове представлення такої моделі в середовищі Mathlab Simulink (рис. 1) побудоване відповідно до [1], розділ "2.1. Single Diode Model (SDM) … " та "Chapter 2.1.1. Parameter Estimation of SDM …". Кожен блок на рис. 1 представляє окреме математичне рівняння.

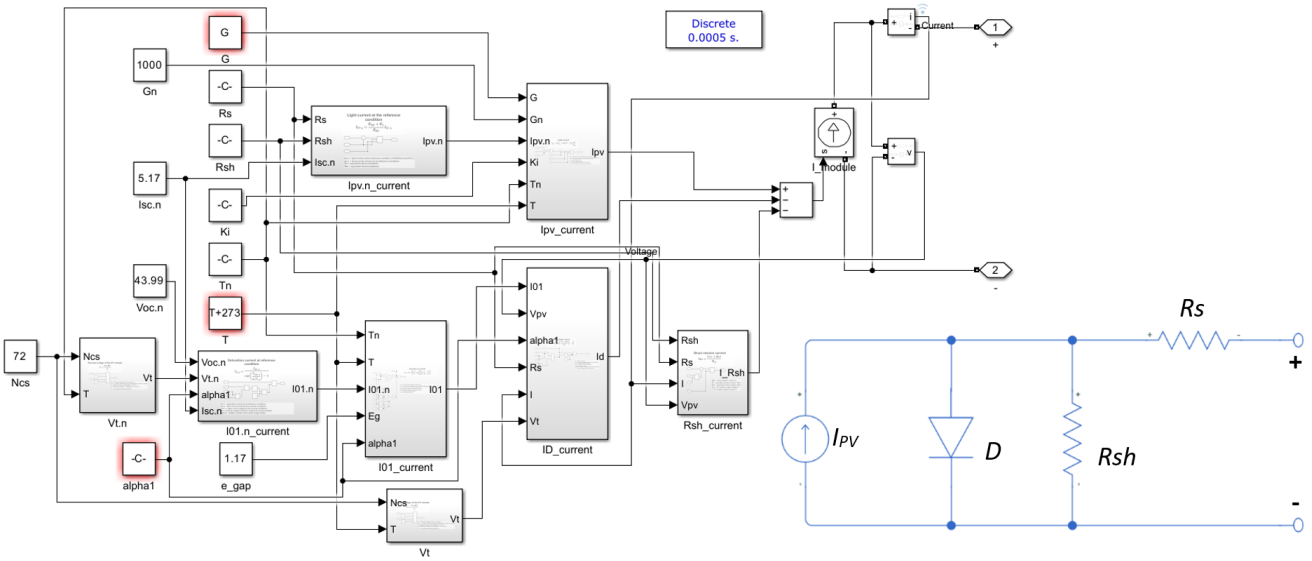


Рис. 1. Модель Simulink фотоелектричного модуля

Як змінні в моделі використовуються такі параметри: *G* – сонячна радіація на поверхні ФЕМ ($Вт/м^2$), *Gn* – вона ж за нормальних умов ($Вт/м^2$), *Rs* – еквівалентний послідовний опір (*Ом*), *Rsh* – еквівалентний паралельний опір (*Ом*), *T* – температура навколишнього середовища (*К*), *Tn* – нормальна температура (*К*), *Isc.n* – струм короткого замикання за нормальних умов (*А*), *Ki* – температурний коефіцієнт струму короткого замикання (*А/К*), *Ncs* – кількість

послідовно з'єднаних чарунок фотоелектричного модуля, *Voc.n* – напруга холостого ходу за нормальних умов (*B*), *alpha1* – коефіцієнт ідеальності одиничного діоду, *e_gap* – ширина забороненої зони p-n переходу. Ця модель є типовою і не претендує на точне відтворення електричних характеристик реального ФЕМ, зокрема, вона містить лише один паразитний діод і не враховує температурного коефіцієнта напруги. Проте така модель все-таки видається достатньо складною для задач моделювання великого масиву ФЕМ, крім того, не всі необхідні параметри можуть бути доступними у технічній документації виробника. Напевно, найважче знайти коефіцієнт ідеальності одиничного діода (*alpha1*). Цей параметр на практиці використовується для точного позиціонування MPPT точки на вихідній характеристиці ФЕМ.

Для вибору відсутніх параметрів, наведених вище, пропонується оцінювати їх чутливість до річної генерації електроенергії. Як результат можна вибрати невідомі параметри за їх типовими значеннями зі збереженням прийнятної точності моделювання генерації електроенергії. Далі наведене обґрунтування, що точне визначення величини *alpha1* не є необхідним для моделей ФЕМ в задачах оцінки річної генерації електроенергії. Аналіз проводився на кліматичних даних, отриманих з ресурсу [2] – погодинні значення прямої сонячної радіації на горизонтальну поверхню та температури повітря за 2019 рік для географічних координат Києва. Кліматичні дані попередньо приведені до середніх за місяць значень. Модель ФЕМ відповідає одиничному модулю A10Green Technology A10J-S72-175 номінальною потужністю 175 Вт, для якого відоме значення *alpha1* = 0,98852.

Результат наведено в табл. 1

Таблиця 1

				alpha1 (коефіцієнт ідеальності діода)	**0.98852** (референсне)	**0.8**	**1**	**1.2**	**1.4**	**1.6**
Місяць	Світлий час доби, г		Середня температура, С°	Середня сонячна радіація, Вт/м^2	Місячна генерація, кВт·г					
Січень	302		-7	107	2.83	2.91	2.83	2.75	2.66	2.57
Лютий	304		-2	182	6.51	6.75	6.50	6.25	6.00	5.76
Березень	395		5	236	12.41	12.89	12.39	11.90	11.43	10.97
Квітень	439		11	310	19.95	20.71	19.90	19.13	18.39	17.69
Травень	496		18	328	25.11	26.08	25.05	24.08	23.15	22.27
Червень	536		24	382	33.39	34.66	33.32	32.05	30.86	29.72
Липень	518		22	393	32.82	34.05	32.74	31.51	30.35	29.24
Серпень	479		23	380	29.51	30.63	29.45	28.33	27.27	26.26
Вересень	408		18	306	19.08	19.83	19.04	18.29	17.57	16.89
Жовтень	362		13	232	11.86	12.34	11.83	11.35	10.89	10.45
Листопад	300		5	135	4.65	4.82	4.64	4.46	4.28	4.10
Грудень	269		2	87	2.08	2.13	2.08	2.02	1.95	1.88
	Річна генерація, кВт-г				**200.21**	**207.82**	**199.76**	**192.10**	**184.79**	**177.80**
	Відсоток відносно моделі з параметром *alpha1* = 0.98852				**100.0%**	**103.8%**	**99.8%**	**95.9%**	**92.3%**	**88.8%**

Як видно, відмінність генерації для різних значень коефіцієнта ідеальності не перевищує 12 %, тоді як точність прогнозу кліматичних даних на добу наперед рідко перевищує 10 %. Тобто можна зробити висновок, що якщо значення коефіцієнта ідеальності діода не відоме, його можна брати з діапазону *alpha1* = 1…1,5, як рекомендовано в [1], або вибирати значення *alpha1* = 1.3, відповідно до джерела [3], неістотно втрачаючи в доцільній точності оцінки генерації. Аналогічним чином пропонується проводити подальше спрощення моделі, зокрема її структури – шляхом зменшення кількості рівнянь, та верифікацію таких спрощень для доцільності використання в задачах прогнозу генерації великих масивів ФЕМ.

ПОСИЛАННЯ

1. *Fahim, S. R.; Hasanien, H. M.; Turky, R. A.; Aleem, S.H.E.A.; Ćalasan, M. A.* Comprehensive Review of Photovoltaic Modules Models and Algorithms Used in Parameter Extraction. Energies 2022, 15, 8941. https://doi.org/10.3390/en15238941.
2. Електронний ресурс https://www.renewables.ninja/.
3. *H. Tiana, F. Mancilla–David, K. Ellis, E. Muljadic, P.Jenkins.* Detailed Performance Model for Photovoltaic Systems: Preprint. Published July 2012, NREL/JA-5500-54601.

УДК 621.3

ВПЛИВ НА РОБОТУ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ РЕЖИМІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ І РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

В. О. Комар[1], І. І. Смагло[2], В. В. Нетребський[3]

Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна,
тел.: (067) 987-51-70, e-mail: kvo1976@ukr.net

У роботі виконано аналіз джерел літератури та виконано натурне й математичне моделювання режимів фотоелектричних станцій та розподільних електричних мереж. Це дозволило пояснити залежність надійності та безперебійності роботи силових трансформаторів у розподільних мережах від режиму роботи мереж і фотоелектричних станцій. Виділено основні процеси, які спричиняють перегрів частин слових трансформаторів та стають причиною їх виходу з ладу.

Ключові слова: *силові трансформатори, розподільні електричні мережі, фотоелектричні станції, реверсивні потоки потужності, резонанси напруги та струму.*

INFLUENCE ON THE OPERATION OF POWER TRANSFORMERS OF THE MODES OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS AND DISTRIBUTION NETWORKS

V. Komar[1], I. Smaglo[2], V. Netrebsky[3]

Vinnytsia National Technical University
95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021
phone: (067) 987-51-70, e-mail: kvo1976@ukr.net

The paper analyzes the literature and performs full-scale and mathematical modeling of the modes of photovoltaic power plants and distribution power grids. This made it possible to explain the dependence of the reliability and uninterrupted operation of power transformers in distribution networks on the mode of operation of networks and photovoltaic power plants. The main processes that cause overheating of parts of power transformers and cause their failure are highlighted.

Key words*: power transformers, power distribution networks, photovoltaic power plants, reverse power flows, voltage and current resonances.*

ORCID: [1]0000-0003-4969-8553; [2]0000-0003-2662-0091; [3]0000-0003-2855-1253.

Вступ

Прогнозується, що глобальний попит на електроенергію зросте майже на 50 % до 2050 року, що робить розумний розподіл енергетичних ресурсів важливішим, ніж будь-коли. Як наслідок, продовжує спостерігатися експоненціальне зростання використання розподілених енергетичних ресурсів, як-от сонячна фотоелектрична та енергія вітру [1]. Для якісного й надійного передавання електричної енергії до споживачів потрібна нормальна робота елементів електроенергетичної системи. Основним її елементом є силові високовольтні трансформатори (СТ). Від справної роботи силових трансформаторів залежать надійність електропостачання, якість електричної енергії, економічність процесу її транспортування та розподілу.

Метою роботи є аналіз впливу відновлюваних джерел енергії на пошкоджуваність силових трансформаторів у розподільних електричних мережах.

Основна частина

Результати досліджень джерел літератури свідчать про те, що як в Україні, так і за кордоном чимало пошкоджень вузлів і деталей СТ припадає на пошкодження обмоток та магнітопроводів [2].

Сучасні силові трансформатори часто розраховані на більшу густину потоку, щоб зменшити розмір трансформатора. Однак за вищій щільності потоку втрати в осерді і, як наслідок, збільшення температури може стати проблемою. Зі збільшенням розповсюдження ВДЕ реверсний потік електроенергії стає проблематичним. Оскільки існуючі

методики вибору силових трансформаторів не враховують реверсивних потоків, що призводить до їх перегріву під час експлуатації.

Реверсивні потоки зумовлені зростанням генерованої потужності відновлюваними джерелами енергії, які приєднанні до розподільних мереж. При цьому їх потужність перевищує споживання, що зумовлює перетікання надлишку енергії в мережі вищих класів напруги. Це призводить до зростання втрат в силових трансформаторах, які здебільшого зумовлені втратами на нагрівання.

Трансформатори спроєктовані для роботи на лінійній частині ВАХ. Зростання щільності потоку в осерді зумовлює зростання насичення в ньому. Це призводить не лише до перегріву, але й до переходу на нелінійну частину ВАХ. При цьому силовий трансформатор починає спотворювати синусоїду напруги і струму.

Поява вищих гармонік в мережах зі значним використанням кабельних ліній може стати причиною появи резонансів напруги та струму. Це призводить до перегріву елементів силових трансформаторів, що знижує їх термін експлуатації.

У сучасних електричних мережах найрозповсюдженішим видом силової електроніки є інвертори. Вони швидко стають домінуючим типом пристроїв у сучасній енергосистемі [3], поєднуючи генерацію, зберігання та навантаження. Це призводить до ситуації, зокрема в системі розподілу, за якої кілька інверторів підключені близько один до одного, що може стати причиною небажаної взаємодії між інверторами та між інверторами та мережею [4]. Ці взаємодії можуть проявлятися у вигляді коливань струму в електромережі, що може призвести до проблем з якістю електроенергії та відключення обладнання.

Хоча виробники інверторів розробляють їх для стабільної роботи при підключенні до мережі спостерігаються певні проблеми під час паралельної роботи, які досліджуються в низці наукових робіт, зокрема в [5], де розглядаються проблеми в мережі з високим проникненням фотоелектричних інверторів, що зумовлюють невідповідність показників якості електроенергії, які перевищували стандарти, і іноді призводили до несподіваного відключення інверторів. Було визначено, що ці проблеми викликані паралельними резонансами між паралельними інверторами та послідовним резонансом між паралельними інверторами та мережею [6, 7].

Висновок

Проведений аналіз та моделювання доводять безпосередній вплив режимів роботи фотоелектричних станцій, а відповідно, і режимів розподільних електричних систем на надійність і безперебійність силових трансформаторів, які застосовуються в цих мережах.

ПОСИЛАННЯ

1. Murdock, H. E.; Gibb, D.; Andre, T.; Sawin, J. L.; Brown, A.; Ranalder, L.; Collier, U.; Dent, C.; Epp, B.; Hareesh Kumar, C. et al. Renewables 2021—Global Status Report. 2021. Available online: https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf (accessed on 22 July 2022).
2. R. Roychowdhury, X. Wu, M. Russ, D. Fleming and J. Spalding, "Stepping Up to the Future with Power Transformers: Power Transformer Asset Management Strategies: State of the Art and Recommendations for the Future," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 21, no. 2, pp. 40–50, March-April 2023, doi: 10.1109/MPE.2022.3230889
3. Blaabjerg, F.; Yang, Y.; Ma, K.; Wang, X. Power electronics-the key technology for renewable energy system integration. In Proceedings of the 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), Palermo, Italy, 22–25 November 2015; pp. 1618–1626.
4. Agorreta, J. L.; Borrega, M.; López, J.; Marroyo, L. Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants. IEEE Trans. Power Electron. 2010, 26, 770–785.
5. Enslin, J. H.; Heskes, P. J. Harmonic interaction between a large number of distributed power inverters and the distribution network. IEEE Trans. Power Electron. 2004, 19, 1586–1593.
6. Li, C. Unstable operation of photovoltaic inverter from field experiences. IEEE Trans. Power Deliv. 2017, 33, 1013–1015.
7. Liu, Q.; Liu, F.; Zou, R.; Li, Y. Harmonic Resonance Characteristic of Large-scale PV Plant: Modelling, Analysis and Engineering Case. IEEE Trans. Power Deliv. 2022, 37, 2359–2368.

УДК 621.3

ВПЛИВ ТЕХНІЧНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ НА РЕЗУЛЬТАТИ ПРОГНОЗУВАННЯ ГРАФІКІВ ЇХ ГЕНЕРУВАННЯ

В. О. Комар[1], Є. А. Тептя[2], О. М. Буряк[3]

Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна,
тел.: (067) 987-51-70, e-mail: kvo1976@ukr.net

У цій роботі було досліджено вплив часткового затінення на продуктивність фотомодулів. Аналіз проводився на дослідній фотоелектричній станції Вінницького національного технічного університету. Дослідження було проведено на одній панелі 315 Вт, а потім спроєктовано на всю систему (10 панелей). Результати показали, що втрати відбуваються тільки в струмі й потужності, тоді як напруга показала менший вплив при частковій тіні.

Ключові слова: *фотоелектричні станції, прогнозування, фотомодулі, затінення, вольт-амперна характеристика.*

INFLUENCE ON THE OPERATION OF POWER TRANSFORMERS OF THE MODES OF PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS AND DISTRIBUTION NETWORKS

V. Komar[1], Ye. Teptya[2], O. Buryak[3]

Vinnytsia National Technical University
95 Khmelnytske shose, Vinnytsia, Ukraine, 21021
phone: (067) 987-51-70, e-mail: kvo1976@ukr.net

This paper investigates the effect of partial shading on the performance of PV modules. The analysis was carried out at the Vinnytsia National Technical University's pilot photovoltaic plant. The study was conducted on one 315 W panel and then projected to the entire system (10 panels). The results showed that losses occurred only in current and power, while voltage showed a smaller impact under partial shade.

Key words*: photovoltaic power plants, forecasting, PV modules, shading, volt-ampere characteristic.*

ORCID: [1]0000-0003-4969-8553; [2] 0009-0005-0538-4773; [3]0000-0003-2855-1253.

Вступ

На продуктивність фотоелектричних панелей впливають сонячне випромінювання, температура і тінь [1]. Затінення можна поділити на два основних типи: повна тінь і часткова тінь. Часткове або повне затінення може бути спричинене сусідніми будівлями, хмарами, вежами або деревами [2], і навіть забрудненнями на елементах панелі, як-от пил або пташиний послід [3]. Вплив затінення на продуктивність фотоелектричного масиву є важливим, оскільки воно ітотно впливає на ефективність системи [4–6]. Тінь, що формується на сонячній панелі, є одним з визначальних факторів, який слід ураховувати під час побудови системи та прогнозування виробітку електричної енергії. Це пов'язано з тим, що тінь впливає на здатність сонячного випромінювання падати на панель. Як наслідок, це призводить до зменшення вихідної електричної потужності, на яку впливає розмір і форма тіні, що утворюється на поверхні сонячної панелі.

Основна частина

Причинами затінення здебільшого є: технічні особливості фотоелектричної станції (відстань між столами, їх нахил, вертикальне, або горизонтальне розташування фотомодулів), інші штучні конструкції (будівлі тощо), природні перешкоди (дерева, кущ, тощо). Під час розв'язання проєктних задач можливість урахування основних причин затінення передбачені програмними засобами, які призначенні для виконання техніко-економічних задач. Під час виконання прогнозування графіка генерування попри те, що фотоелемент є основною одиницею виробництва електроенергії, фотоелектричне моделювання часто виконується на рівні модуля для простоти, оскільки параметри на рівні модуля є набагато доступнішими, і це значно зменшує обчислювальний обсяг моделювання. Однак симуляції

на рівні модуля надто грубі, щоб можна було змоделювати такі ефекти, як невідповідність між комірками або часткове затінення.

У роботі виконується врахування затінення шляхом розрахунку вольт-амперної характеристики на рівні комірки, а наступним кроком об'єнуються окремі характеристики в загальну вольт-амперну характерисмтику фотомодуля.

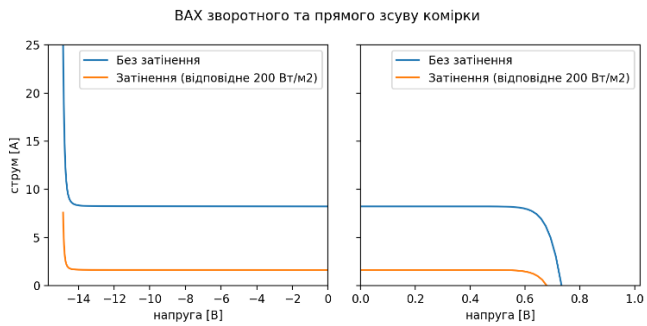


Рис. 1

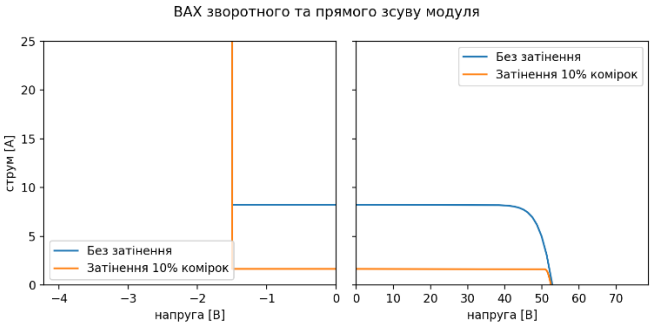


Рис. 2

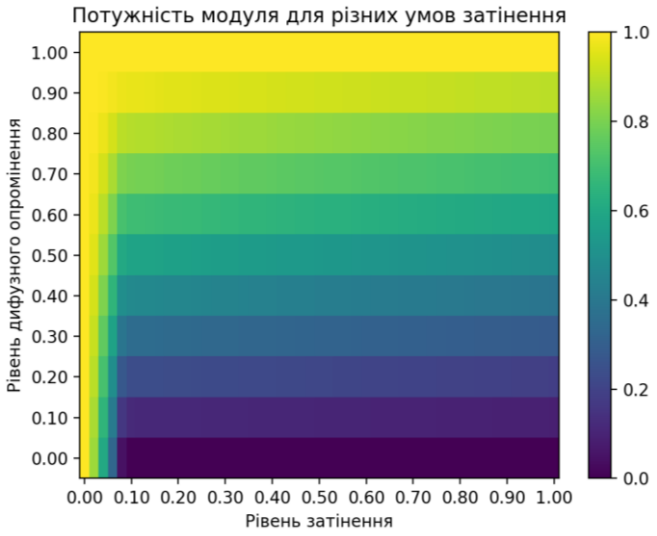


Рис. 3

На рис. 1 та рис. 2 показано ВАХ для комірки й модуля відповідно. На тепловій карті (рис. 3) показано залежність генерованої потужності модуля від рівня затінення та дифузного опромінення.

Висновок

Проведений аналіз та моделювання доводять необхідність урахування затінення фотомодулів, оскільки це прямо впливає на точність виконаних прогнозів.

Найбільший вплив на результати прогнозу має затінення в осінньо-зимовий період, коли спостерігається затінення сусідніми рядами панелей.

ПОСИЛАННЯ

1. S. P., R. Ballal, L. S. P. S., and G. Kumar, "Effect of Shading on the Performance of Solar PV Panel," Energy and Power, vol. 5, no. 1A, pp. 1–4, 2015.
2. I. H. Mahammed et al., "Outdoor study of partial shading effects on different PV modules technologies," Energy Procedia, vol. 141, pp. 81–85, 2017.
3. O. A. Abdulrazzaq, A. Abdullah, S. K. Abdulridha, and M. A. Fakhri, "Dirt-proof Silicon PV Panel Surface using Superhydrophobic Nano-composite," Iraqi J. Ind. Res., vol. 5, no. 2, pp. 1–8, 2018.
4. E. Koutroulis and F. Blaabjerg, "A New Technique for Tracking the Global Maximum Power Point of PV Arrays Operating Under Partial-Shading Conditions," IEEE J. Photovoltaics, vol. 2, no. 2, pp. 184–190, 2012.
5. A. Salloom, O. Abdulrazzaq, and B. Ismail, "Assessment of the Performance of Bifacial Solar Panels," Int. J. Eng. Tech. Res., vol. 8, no. 7, pp. 13–17, 2018.
6. A. H. Salloom, O. A. Abdulrazzaq, B. H. Ismail, and A. D. Salman, "Ground Effect on the Performance of Back-to-back Stacked Silicon Solar Panel System: An Imitation for a Bifacial Solar Panel," Iraqi J. Ind. Res., vol. 6, no. 1, pp. 8–15, 2019.

INFLUENCE OF TEXTURE FORMED ON THE SURFACE LAYER OF A SILICON-BASED SOLAR CELL ON THE PHOTOELECTRIC PARAMETERS

R. Aliev[1], S. Temirov[1], M. Nosirov[1], A. Mirzaalimov[2] , M. Komilov[1]

[1] Andijan State University, Andijan, Uzbekistan.
[2] Andijan State Pedagogic Institute, Andijan, Uzbekistan.
Tel: +998979964272, E-mail: sodiqjontemirov@yahoo.com

One of the modern methods of generating electricity through solar cells using sunlight is to treat their surface layers. Solar cells generate electricity by absorbing light through their surface layer. In order to increase this absorption, plain and surface-treated solar cells were compared. Comparisons show that the silicon-based solar cell with surface treatment achieved a short-circuit current 1.2 times higher than that of a conventional solar cell. Surface treatment was achieved by texturing its smooth surface.

Keywords: *silicon, Centaurus TCAD, plain and textured solar cell.*

The development of science has made a significant contribution to the development of solar energy, one of the renewable energy sources. In particular, the use of solar energy is carried out through solar cells. Solar cells absorb sunlight through their surface layers and convert it into electrical energy. The way light interacts with a solar cell depends on its surface area. It can be used effectively as a result of sunlight falling on a flat and uneven surface. For this purpose, the surface layer of the solar cell is treated in various ways [1]. By creating a texture on a surface layer, it is possible to control the amount of light that falls on it [2]. By exposing textured surfaces to light multiple times, it is possible to achieve greater light absorption. In this research work, texturing the surface layer of a solar cell resulted in an increase in its efficiency. Accordingly, greater efficiency was achieved compared to a solar cell with a simple smooth surface. Below is a visual representation of the texture created on the surface layer of the solar cell and the resulting outcome, Figure 1.

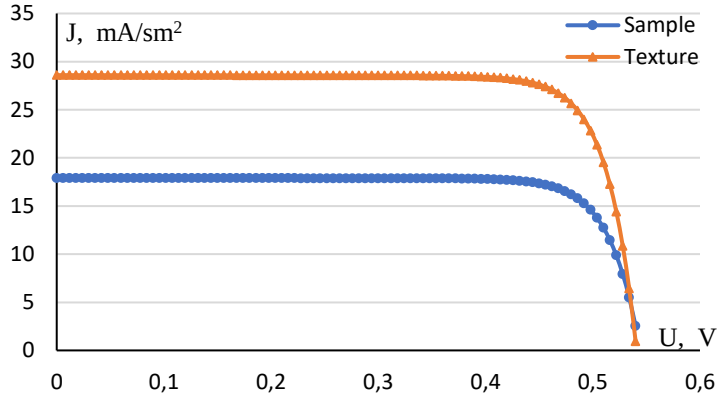


Fig. 1. VAX of a silicon-based simple and textured solar cell

Accordingly, it can be seen that a solar cell with a glaze layer treatment has a higher efficiency than a regular solar cell. It can be seen that the current density for the simple solar cell reaches 17.87 mA/cm2 and for the textured solar cell reaches 28.59 mA/cm2. As a result, it was found that the short-circuit current density in it is 1.6 times greater than that of a conventional solar cell.

REFERENCES

1. G'ulomov J., Madaminova I., Nishonboyev V., Aslonov H., Dehqonboyev O, Quyosh elementlarining optik xususiyatlarini yaxshilash usullari, Young Scientist. Uzbekistan, April 2020
2. Hadi Bashiri1, Mohammad Azim Karami2*, and Shahram Mohammad Nejad, Crystalline Silicon Solar Cell Engineering to Improve Fill Factor, Open Circuit Voltage, Short Circuit, Current and Overall Cell Efficiency MODARES JOURNAL OF ELECTRICAL ENGINEERING, VOL 14, NO 4, WINTER 2014

УДК 004.032.26

ТЕХНОЛОГІЯ ВИЯВЛЕННЯ ДЕФЕКТІВ НА ОСНОВІ ТЕПЛОВОГО ЗОБРАЖЕННЯ У ВЕЛИКИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМАХ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА

А. М. Клочков

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, Україна, 03143
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: a_klochkov@ukr.net

Під час розв'язання поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення фізичних властивостей фотоелектричних систем та особливостей їх діагностики.

Ключові слова: *теплове зображення, фотоелектрична система, безпілотний літальний апарат, тепловізор, дефект.*

THERMAL IMAGING-BASED DEFECT DETECTION TECHNOLOGY IN LARGE PHOTOVOLTAIC SYSTEMS USING AN UNMANNED AERIAL VEHICLE

A. Klochkov

Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine
50 Metrolohichna str., 50, Kyiv, Ukraine, 03143
phone:(044) 206-28-09, e-mail: a_klochkov@ukr.net

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used based on the study of the physical properties of photovoltaic systems and the features of their diagnostics.

Keywords: *thermal imaging, photovoltaic system, unmanned aerial vehicle, thermal imager, defect.*

ORCID: 0009-0009-6139-7711

Зростаючий попит на стійкі джерела енергії сприяв значній інтеграції фотоелектричних систем у світове виробництво енергії. Мінімальні викиди вуглецю, відновлюваність і широкий потенціал застосування сонячної енергії роблять її пріоритетною порівняно з іншими джерелами енергії [1]. Таким чином, впровадження фотоелектричних систем, які використовують сонячну енергію для виробництва електроенергії, досягло значного прогресу останніми роками [1].

Однак ефективне функціонування та довговічність фотоелектричних систем потребують регулярного обслуговування та діагностики. Ідентифікація дефектів фотоелектричних систем на ранніх стадіях розвитку допоможе уникнути вартісних та тривалих ремонтів. Безконтактне виявлення несправностей має вирішальне значення для виявлення проблем, які негативно впливають на продуктивність системи, мінімізуючи витрати на технічне обслуговування та гарантуючи безперебійну роботу потужностей, що виробляють електроенергію [2]. Звичайні методи виявлення несправностей включають візуальний огляд, вимірювання ВАХ та електролюмінесцентне (ЕЛ) тестування [3]. Проте впровадження цих методів у великих фотоелектричних системах є складним і ресурсомістким.

Ці проблеми зробили технологію тепловізійного контролю вирішальною для фотоелектричних сонячних систем. Тепловізор – це техніка, яка використовується для візуалізації розподілу температури фотоелектричного модуля температури, що дозволяє швидко виявити можливі проблеми, такі як гарячі точки, пошкоджені модулі та дефектні з'єднання. Крім того, тепловізійний контроль є неінтрузивним методом, який дозволяє негайно ідентифікувати несправності, не порушуючи функціонування фотоелектричної системи. Завдяки цій можливості тепловізори ретельно перевіряють великомасштабні фотоелектричні установки.

Враховуючи той факт, що фотоелектричні сонячні системи здебільшого мають великі масштаби та індивідуальне розташування, для діагностики несправностей доцільно використовувати Дрон / БПЛА високої роздільної здатності з тепловою та оптичною зйомкою. Безпілотні літальні апарати (БПЛА) забезпечують швидке сканування великих регіонів і значно спрощують збір даних у місцях з обмеженим наземним доступом. Безпілотні літальні апарати (БПЛА), оснащені тепловізійною камерою, використовуються для швидкого огляду великих областей фотоелектричних панелей і виявлення будь-яких аномалій.

Процедура збору даних здійснюється за допомогою тепловізійної технології. Кількісне визначення температури поверхні фотоелектричних панелей за допомогою тепловізійних камер високої роздільної здатності дає швидкі й точні результати для виявлення дефектів. Процес тепловізійного зображення здебільшого використовує різні технічні пристрої та методики.

Як тепловізор використовують тепловізійну камеру, яка прикріпиться до безпілотного літального апарата для ефективного огляду фотоелектричної системи. Дані збираються за сприятливого сонячного світла з 10:00 до 14:00, коли панелі піддаються максимальному термічному навантаженню, що дозволяє точніше виявляти дефекти, такі як гарячі точки. БПЛА оглядає фотоелектричну систему, роблячи теплові фотографії з високою роздільною здатністю всіх панелей. Крім того, теплова камера пропонує миттєве зображення, виявляючи різкі коливання температури з надзвичайною чутливістю.

Тепловізор є ефективним методом для швидкої та неінвазивної ідентифікації дефектів у фотоелектричних системах; ця технологія має деякі обмеження. Змінні середовища можуть впливати на точність теплового зображення. Погодні фактори, включно з вітром, дощем і похмурим небом, можуть ускладнити ідентифікацію несправності, зменшуючи помітність коливань температури. Крім того, роздільна здатність теплових камер може обмежити виявлення незначних дефектів, особливо у великих фотоелектричних установках. Обмеженням, що перешкоджає розгортанню цієї технології, є вартість тепловізійних камер високої роздільної здатності.

Та все-таки кваліфікація є важливою для точного аналізу результатів тепловізійного зображення. Неправильна інтерпретація результатів тепловізійного контролю може призвести до помилкової діагностики та зайвих витрат на технічне обслуговування. Отже, послідовне навчання та складні аналітичні методи є важливими для використання тепловізора як ефективного підходу до виявлення дефектів.

У цій роботі представлено технологію виявлення дефектів на основі теплового зображення, яка ефективно зменшує втрати енергії, особливо у великих фотоелектричних системах. Раром з тим точна та швидка реалізація цієї стратегії є важливою через технологічні обмеження.

У подальших дослідженнях будуть сформовані достатні умови для застосування лише тепловізійного контролю, введені коефіцієнти інформативності та аплікативності запропонованої методики. Сформовано методику вибору та комбінації різних діагностичиних технологій, зокрема електролюмінесцентного тестування та використання алгоритмів машинного навчання, з метою підвищення точності виявлення несправностей і мінімізації експлуатаційних витрат.

ПОСИЛАННЯ

1. Полюга В., Жалдак М., Демченко В. Ринок електроенергії в Україні. INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL COMMODITIES AND MARKETS. 2024. № 51. P. 75–91. DOI: 10.31617/2.2024(51)05.
2. Защепкіна Н. М. Телевізійний контроль електролюмінісцентних дефектів сонячних батарей при виконанні PID-тесту / Н. М. Защепкіна, О. П. Яненко, К. М. Божко, І. В. Морозова, О. А. Прищепа. Наукові доповіді НУБіП України. Секція: Техніка і енергетика АПК. № 6(76), 2018. С. 1–11. (фахове видання) http://dx.doi.org/10.31548/dopovidi2018.06.028.
3. Василиха Х. В. Вдосконалення нормативнотехнічної бази випробувань сонячних перетворювачів: дис. канд. техн. наук : 05.01.02 / Національний університет «Львівська політехніка». Львів, 2017. 170 с.

УДК 621.316.1

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ СЕС

А. О. Павлов[1], О. М. Мороз[2], О. О. Мірошник[3]

[1]СК МОНОЛИТ, вул. Велика Панасівська, 181, м. Харків, 61017, Україна,
тел.: (050) 343-70-80, e-mail: andriy_pavlov@me.com
[2, 3]Державний біотехнологічний університет, вул. Алчевських, 44, м. Харків, 61002, України,
тел.: (066) 91-37-51, e-mail: moroz.an@ukr.net; тел.: (097) 950-60-33, e-mail: omiroshnyk@ukr.net.

Наведено результати експериментальних досліджень зміни температури поверхні фотоелектричних модулів (ФЕМ) сонячної електростанції (СЕС) потужністю 2,4 МВт, яка розміщена на території м. Мерефа Харківської обл., залежно від температури повітря та середньогодинної потужності станції.

Ключові слова: *сонячна електростанція, фотоелектричні модулі, середньогодинна температура повітря, середньогодинна температура поверхні фотоелектричних модулів.*

FEATURES EXPERIMENTAL STUDIES OF SURFACE TEMPERATURE CHANGES OF PHOTOVOLTAIC MODULES OF THE SPP

A. Pavlov[1], O. Moroz[2], O. Miroshnyk[3]

[1]BK MONOLYT, str. 181 Velyka Panasivska, Kharkiv, 61017, Ukraine,
phone: (050) 343-70-80, e-mail: andriy_pavlov@me.com
[2, 3]State Biotechnological University, str. 44 Alchevskikh St., Kharkiv, 61002, Ukraine,
phone: (066) 91-37-51, e-mail: moroz.an@ukr.net; phone: (097) 950-60-33, e-mail: omiroshnyk@ukr.net.

The paper presents the results of experimental studies of changes in the surface temperature of photovoltaic modules (PVMs) of a 2.4 MW solar power plant (SPP) located in Merefa, Kharkiv region, depending on the air temperature and the average hourly power of the plant.

Key words: *solar power plant, photovoltaic modules, average hourly air temperature, average hourly surface temperature of photovoltaic modules.*

ORCID: [1]0000-0001-9943-4084; [2]0000-0002-8520-9211; [3]0000-0002-6144-7573

Відповідно до вимог Кодексу системи передачі [1] планування розвитку енергосистеми має виконуватися з урахуванням балансової надійності. Тому вкрай важливим є питання підвищення точності прогнозування графіків генерації СЕС, що дозволить знизити потребу в обсягах балансувальних потужностей, а отже, забезпечити балансову надійність енергосистеми України в умовах різких коливань змінної генерації СЕС.

Значний вплив на генерацію СЕС має температура поверхні фотоелектричних модулів (ФЕМ) [2, 3], тому для дослідження зміни температури модулів були проведені експериментальні дослідження на обладнанні СЕС потужністю 2,4 МВт по модулях і 2 МВт по потужності інверторів, яка розміщена на території м. Мерефа Харківської обл. Ця місцевість характеризується помірно континентальним кліматом: зима холодна та сніжна, але мінлива, літо спекотне. Влітку, у серпні, було зафіксовано максимальне значення температури – 39,8 °С, взимку мінімальне значення температури, –35,6 °С, було зафіксовано в січні [4]. Отже, діапазон зміни температури повітря в Харківському регіоні сягає 75,4 °С. Оскільки технічні параметри ФЕМ наведено за температури 25 °С, то діапазон коливання температури повітря відносно 25 °С може бути від –60,6 до +14,8 °С, і відповідно потужність СЕС за рахунок тільки зміни температури повітря може збільшуватись на 23,6 % і зменшуватись на 5,8 %. Але генерація електричної енергії ФЕМ супроводжується нагріванням поверхні модулів, що своєю чергою призводить до зміни потужності СЕС, тому дослідження температури модулів є необхідною умовою створення адекватної прогнозної моделі генерації СЕС.

Метою дослідження було отримання залежності температури поверхні ФЕМ від потужності станції. На СЕС встановлені ФЕМ RISEN RSM72-6-365M-5BB, температурний коефіцієнт потужності становить 0,39 %/°С, тобто підвищення температури на 1 °С призводить до зменшення потужності на 0,39 % максимальної потужності, і це становить 1,42 Вт. Оскільки прогноз генерації СЕС потрібно здійснювати погодинно, то і температура ФЕМ повинна визначалася як середня за годину. Для дослідження температури нижньої поверхні ФЕМ використовувався датчик температури DS18B20 з точністю вимірювань ± 0,5 °С в діапазоні температур від –10 °С до +85 °С, який був встановлений

на нижній поверхні модуля. Реєстрація показань датчика температури здійснювалась за допомогою регістратора даних SmartLogger, для контролю показань датчика температури використовувався тепловізор Flir E63900.

Результати досліджень показали, що спостерігається чітка залежність між активною потужністю та температурою модуля, хоча є певне відставання зміни температури модуля від зміни активної потужності, що пояснюється тепловою інерцією ФЕМ. Оскільки температури поверхні ФЕМ значною мірою залежить від температури повітря, то була досліджена залежність перевищення середньогодинної температури модулів над середньогодинною температурою повітря залежно від середньогодинної потужності СЕС. Результати досліджень різниці температури поверхні ФЕМ і повітря в ясні дні (Clear sky) за літні місяці наведено на рис. 1 (перша половина дня) і рис. 2 (друга половина дня).

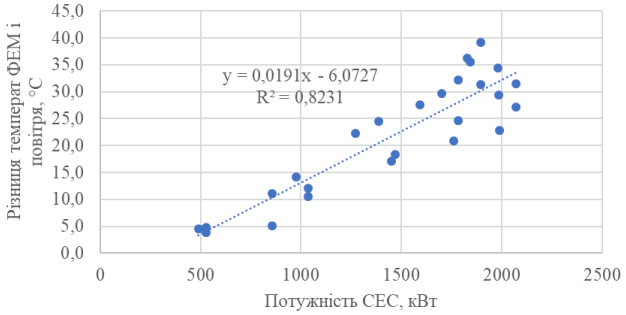


Рис. 1. Експериментальні дані різниці середньогодинної температури поверхні ФЕМ та повітря для першої половини дня влітку

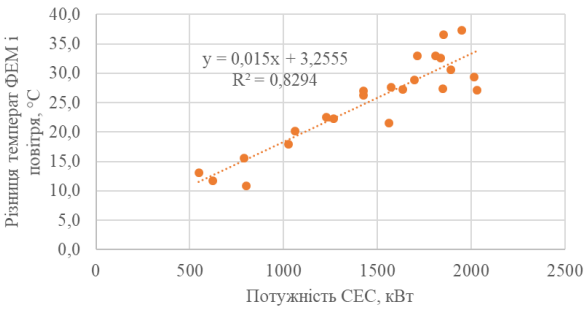


Рис. 2. Експериментальні дані різниці середньогодинної температури поверхні ФЕМ та повітря для другої половини дня влітку

Графіки різниці середньогодинної температури ФЕМ та середньогодинної температури повітря залежно від середньогодинної потужності СЕС описується лінійними рівнянням з коефіцієнтами детермінації (R2) графіка більше 0,82. При потужності СЕС 500 кВт різниця температур поверхні ФЕМ та повітря в першій половині дня становила 5 °С, а в другій половині дня – 10 °С, тому в діапазоні потужностей станції від 0 до 500 кВт різниця температур для першої половини дня визначається за лінійною залежністю

$$\Delta t_{i1} = 0{,}01\ P_{ahi1},$$

а для другої половини дня

$$\Delta t_{i1} = 0{,}02\ P_{ahi2},$$

де P_{ahi1} і P_{ahi2} – відповідно середньогодинні потужності СЕС для першої та другої половини дня.

Різницятемператур $\Delta t_2 - \Delta t_1$, обрахованих за формулами для другої та першої половини дня, при потужності СЕС 500 кВт становить 7 °С, при збільшенні потужності різниця зменшується до 0,5 °С. Різниця температур при менших потужностях пояснюється тепловою інерцією ФЕМ. Максимальне відхилення розрахованих різниць температур від фактичних для першої половини дня становить 9 °С, а для другої половини дня – 6,6 °С. З урахуванням температурного коефіцієнта потужності ФЕМ відхилення потужності за рахунок відхилень розрахункових значень різниці температур становитиме відповідно 3,42 та 2,5 %.

Отримані результати досліджень дозволили підвищити точність прогнозування погодинної генерації СЕС; так, за результатами прогнозування сума погодинних відхилень прогнозу від факту в 2023 році становила 22,74 %, а в 2024 році – 21,11 %.

ПОСИЛАННЯ

1. Про затвердження Кодексу системи передачі. Документ v0309874-18, чинний, поточна редакція — Редакція від 31.05.2024, підстава – v1036874-24. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0309874-18#Text. (дата звернення: 10.03.2025).
2. Мороз, О. М., О. О. Мірошник, А. О. Павлов, О. А. Савченко, і М. Ю. Тоберт. «Експериментальні дослідження факторів впливу на генерацію сонячної електростанції». Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність, вип. 2(3), Грудень 2021, с. 114–123, doi:10.20998/2224-0349.2021.02.04. (дата звернення: 10.03.2025).
3. National Renewable Energy Laboratory, System Advisor Model (SAM), 2023. [Online]. Available: https://sam.nrel.gov. (дата звернення: 10.03.2025)
4. Клімат Харкова. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Клімат_Харкова. (дата звернення: 04.03.2025).

PROBLEMS IN THE STRUCTURES AND MANUFACTURING TECHNOLOGY OF PEROVSKITE

Rustam Kabulov[1], Aleksandr Kutlimuratov[1], Mardon Khajiev[1], Ximmatali Joraev[1], Latofat Shuhratova[1], Abduvoxid A.Ganiev[2], Sevinch Khajieva[1]

[1]Physical-Technical Institute, Uzbekistan Academy of Sciences,
Chingiz Aytmatov 2B, Tashkent, Uzbekistan, 100084
phone: +998(90) 0456783, e-mail: ftikans@uzsci.net
[2]Tashkent State Technical University, Universitetskaya Street 2, Tashkent, 100095
phone: +998(98) 3082359, e-mail: abduvohidganiyev@gmail.com

This article examines the structural and fundamental aspects of perovskite solar cells (PSC) that lead to significant performance improvements, as well as creative strategies to enhance PSC stability in extreme environments such as high temperatures and prolonged lighting.

Key words: *perovskite solar cells, photovoltaics, the width of the forbidden zone, crystal structure.*

ORCID: [1]0000-0003-3157-9038; [2]0000-0003-1879-1931

Recently, materials called perovskite have appeared in the literature devoted to the production of semiconductor materials suitable for the production of solar cell and light-emitting diodes (LED). Despite the fact that a short time has passed since the first reports about perovskite appeared, a huge number of works on perovskite have been published. Various types of perovskite of various crystalline character appeared in print. Among them, CsPbX3 type perovskite (X– halide anion) are particularly distinguished, which are intensively studied in many research centers and laboratories around the world [1]. Because inorganic perovskite of the CsPbX3 type are promising materials for creating a wide range of optoelectronic devices. Since they have a high quantum yield of luminescence (50-90%) [2], and absorb light well in the ultraviolet (UV) and visible range of electromagnetic radiation [2], which is of great importance for the creation of optoelectronic and photovoltaic devices. The most important advantage of perovskite is the relative simplicity of their synthesis using various methods. The possibility of selecting the required band gap width in the visible range by changing the composition is especially attractive from the point of view of application in the creation of perovskite solar cells [2]. Due to the modulations of the composition, it is possible to easily adjust the band gap energy to the electromagnetic radiation spectrum in the range of 410-700 nm, which is relevant for the effective conversion of solar energy [1-2].

However, it is also known that the crystal structure of perovskite can be easily damaged by various external factors. For example, under the influence of UV light, temperature, humidity, oxygen and other external factors, their composition and crystal structure may change, and therefore their photovoltaic properties. In turn, this can lead to deterioration of their photovoltaic properties over time [3]. Since this instability of the properties of perovskite severely limits the practical application and, therefore, increasing the stability of their parameters is the main task of semiconductor physics and semiconductor materials science.

Researchers of perovskite solar cell (PSC)s apply different perovskite structures to create PSCs and achieve good results. For the first time in 2009, hybrid organo-inorganic halide perovskite ABX3 (where A is an organic cation, B is usually Pb2+, and X is a halide) in the form of methylammonium lead triiodide (CH3NH3PbI3) were used for PSCs [4].

It should be noted that one of the key tasks that must be solved before their practical application is to obtain stable films of CsPbX3 perovskite nanocrystals (PNC), the wavelength of which can be precisely adjusted. The band gap (Eg) of the CsPbX3 PNC depends on the position of the edge of the conduction band formed by the overlap of the 6s and 6p orbitals of Pb atoms and the edge of the valence band consisting of the p orbitals of the halogen atom. Therefore, the spectral position of the PL peak of PNCs directly depends on the chemical composition of nanocrystals. For example, for CsPbCl3, CsPbBr3, and CsPbI3, the Eg values are 3.0, 2.36, and 1.74 eV, respectively. By varying the composition of PNCs during their synthesis or heat treatment in solution after synthesis, it is possible to obtain CsPbBr(3−x)Ix type perovskites and CsPbBr(3−y)Cly, which have luminescence in the entire visible range of the electromagnetic radiation spectrum. In addition, these PNCs are more stable than conventional CsPbCl3 and CsPbI3 perovskites. PNCs based on caesium-lead iodides are the most promising materials from the point of view of application in PSC. However, at the same time, they are the least thermodynamically stable among the compositions of CsPbX3. In addition, this type of PNCs is more prone to degradation under the influence of light, oxygen, and atmospheric moisture. In this case, one of the possible variants of CsPbI3 PNCs decomposition in air can proceed by the following reaction [5]:

$$CsPbI3(solid) + 3/4O2(gas) + 1/2CO2(gas) + H2O(gas) \rightarrow 1/2Cs2CO3(solid) + 3/2I2 + Pb(OH)2(solid)$$

In addition to the chemical transformations described above, the phase transition of CsPbI3 perovskite from the black α-phase to the yellow non-perovskite δ-phase can also occur at room temperature.Thus, low stability is a serious obstacle to the successful introduction of PNCs of this composition into optoelectronic devices and their commercialization. CsPbBr3 nanocrystals are characterized by the highest stability of structural and optical properties, which is explained by the higher strength of the Pb-Br bond compared to Pb-I, as well as a higher value of the Goldschmidt correspondence coefficient for this composition (t)[6].

Recently, an inverted structure with great potential for single- or multi-junction photovoltaic systems has been used to increase the stability of PSCs structures. This refers to antimony-doped p-type tin oxides (ITOx) in combination with a self-organizing monolayer molecule as an intermediate layer between perovskite and hole-carrying layers (HTL) in inverted PSCs. The ITOx layer increases the chemical stability of the interface, i.e. the redox reaction, which usually occurs at the NiOx/perovskite interface, is insignificant at the ITOx/perovskite interface. In addition, ITOx suppresses nonradiative recombination in the perovskite layer and enhances depletion of the perovskite/HTL interface for efficient charge extraction. Due to these improvements in the uniformity of ITOx deposition over a large area, the authors of [7] achieved an efficiency of 24.8% (for 0.05 cm2) and 24.0% (for 1 cm2) certified by the National Center for Measurement and Testing of the Photovoltaic Industry. Comparing the results of stabilized PSC with modern photovoltaic devices, the authors believe they demonstrate the highest efficiency on an area of 1 cm2.

In this work, we have paid special attention to the structural and fundamental aspects of PSCs, which lead to a significant increase in their productivity. Here we have listed some of the many obstacles and difficulties in improving the productivity and sustainability of the PSCs, but there are still a number of difficulties that need to be addressed. Additional research is needed to improve the internal chemical stability of halide perovskites. Researchers should focus on creating creative strategies to improve the stability of PSCs under extreme conditions such as high temperatures and prolonged lighting. Collaboration between scientists from various disciplines, such as materials science, physics, chemistry, and engineering, can help accelerate progress in this area.

Thus, it can be concluded that PSCs have made significant progress over the past decade, but still face a number of obstacles that need to be overcome before they can be widely used and commercialized.

REFERENCES

1. Protesescu L., Yakunin S., Bodnarchuk M.I., Krieg F., et al. Nanocrystals of cesium lead halide perovskites (CsPbX3, X = Cl, Br, and I): Novel optoelectronic materials showing bright emission with wide color gamut. // Nano Lett. 2015, 15, 3692–3696. https://doi.org/10.1021/nl5048779
2. 2. Gulevich D.G., Change in luminescence of thin nanocrystalline $CsPbBr_3$ perovskite films during the in situ anion exchange reaction. // Journal of Technical Physics, 2023, volume 93, issue 2. – pp. 256-263.
3. Kovalenko M.V., Protesescu L., Bodnarchuk M.I. Properties and potential optoelectronic applications of lead halide perovskite nanocrystals. Science. 2017;358:745–750. doi: 10.1126/science.aam7093.N.A.N. Ouedraogo, Y. Chen, Y.Y. Xiao, Q. Meng, et al. Nano Energy, 67, 104249 (2019). DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104249
4. A. Swarnkar, et al. Quantum dot–induced phase stabilization of a-$CsPbI_3$ perovskite for high-efficiency photovoltaics. // RESEARCH| REPORTS. SOLAR CELLS. 7 OCTOBER 2016. VOL 354. ISSUE 6308. –pp. 92-96. http://science.sciencemag.org
5. D.S. Tstvetkov, M.O. Mazurin, V.V. Sereda, I.L. Ivanov, D.A. Malyshkin, A.Yu. Zuev. J. Phys. Chem. C, 124 (7), 4252 (2020). DOI: 10.1021/acs.jpcc.9b11494
6. N.A.N. Ouedraogo, Y. Chen, Y.Y. Xiao, Q. Meng, et al. Nano Energy, 67, 104249 (2019). DOI: 10.1016/j.nanoen.2019.104249
7. J. Li, H. Liang, C. Xiao, X. Jia, R. Guo, et al. Enhancing the efficiency and longevity of inverted perovskite solar cells with antimony-doped tin oxides. // Nature Energy| Volume 9 | March 2024 | 308–315. https://doi.org/10.1038/s41560-023-01442-1

STUDY OF THE PROPERTIES OF SILICON NANOCLUSTERS WITH GADOLINIUM (GD) ADMIXTURE

K. Zikrillaev[1], A. Ganiev[2], K. Ayupov[3], S. Hasanbayeva[4], A. Karimov [5]

Tashkent State Technical University, 2 Universitetskaya Street , Tashkent, 100095
phone: +998(98) 3082359, e-mail: abduvohidganiyev@gmail.com

Using the technology of multi-stage low-temperature diffusion alloying, nanoclusters of gadolinium impurity atoms in silicon were obtained, which form so-called "hidden Schottky barriers" in the volume, the electrophysical properties of which can be used to create new materials with improved characteristics, as well as new optoelectronic elements. This opens up great opportunities for using such materials in the creation of new highly efficient solar cells with a high degree of integration.

Key words: *low-temperature diffusion, nanoclusters, Schottky Barriers, rare earth elements, electrophysical properties of silicon.*

ORCID: [1]0009-0003-5432-1715; [2]0000-0002-2521-3921; [3]0000-0003-1879-1931

Recent studies have shown that when rare earth elements (REE) are introduced into silicon, its thermal and radiation resistance are significantly increased [1-5]. In addition, the introduction of REE into a silicon matrix makes it possible to create an elementary base of instrument structures with luminescent (electroluminescent, photoluminescent) properties in a wide spectral range for the subsequent development of optoelectronics. This is due to the fact that the electronic transitions in the inner 4f shell are characterized by the independence of the radiation frequency from temperature and a small spectral line width. For example, some rare earth elements emit light of the same wavelength as fiber-optic communication lines. Therefore, the study of the effect of rare earth elements on the electrophysical properties of silicon is a very urgent problem in the science of silicon materials and is of practical interest for the creation of new materials with improved characteristics, as well as new elements of optoelectronics.

Our research has shown that gadolinium clusters located in the silicon layer form so-called "hidden Schottky barriers". The properties of these structures, silicon clusters, are of particular interest. Until now, the creation of a Schottky barrier has been possible only on the surface of a semiconductor material, but on the surface of semiconductors, however, their creation in the bulk of the material is a new and not yet fully understood phenomenon [11-16]. To get to the cluster, 100 microns were removed from the sample surface. Then, using a microprobe, points with gadolinium clusters were detected on the sample surface.

When such a material is illuminated, a photocurrent occurs. This property also makes the resulting material promising for use in semiconductor technology. In addition, this material can be used to create more efficient solar cells and energy sources.

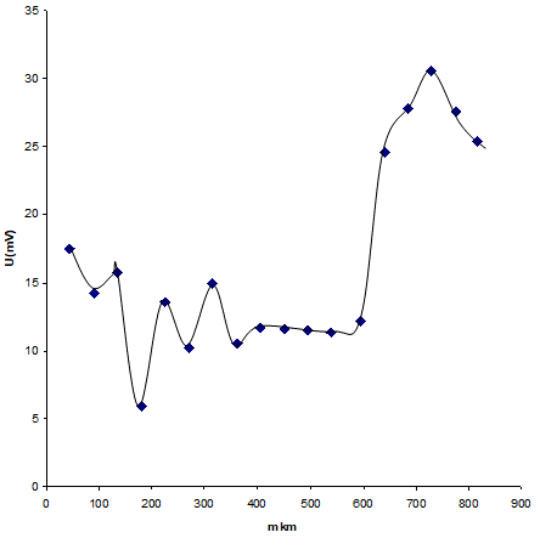


Fig. 1. Variation of the PHOTO EMF of cluster-silicon structures along the length of the sample

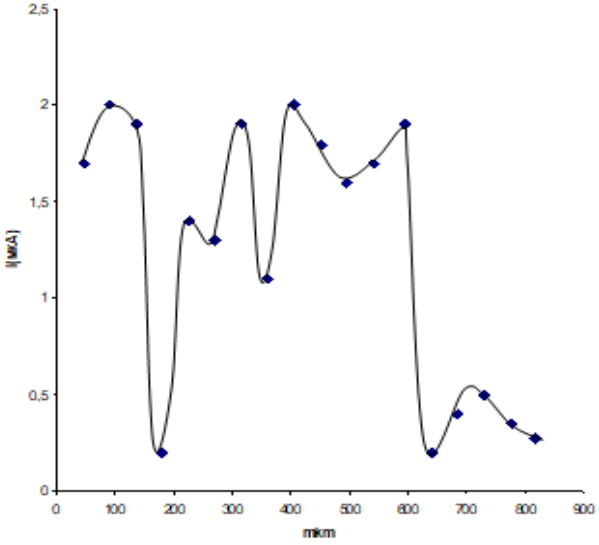


Fig. 2. Change of photocurrent of cluster–silicon structures along the sample length

Previously published papers described the results of studies of gadolinium-doped silicon. However, they investigated the levels of impurities created by gadolinium, the anomalies of photoconductivity, as well as the effect on the fundamental parameters of silicon itself. However, no cluster formation was detected in their samples. In addition, to confirm the sensitivity of such structures to illumination, EMF and photocurrent were measured at these points. (Fig. 1), (Fig. 2) the results of the examination of the sample surface after grinding are shown. As can be seen from the graphs, the maximum photocurrent and photo EMF were recorded precisely at the points where the probe excited the gadolinium cluster. When the probe gets between the clusters, the sensitivity decreases. The change in the EMF and photocurrent is due to the fact that the more clusters there are at the point of contact with the probe, the greater the resistance of this point.

Thus, it is shown that the formation of nanoclusters of atoms in a silicon lattice makes it possible to create diodes and photocells based on a Schottky barrier throughout the entire crystal volume with a sufficiently high concentration. This opens up great opportunities for using such materials in the creation of new highly efficient solar cells with a high degree of integration.

The gadolinium impurity atoms were evenly distributed in the silicon crystal lattice. This suggests that silicon with gadolinium nanoclusters is a new and still unexplored material, the properties of which were disclosed in this work. In connection with all of the above, further study of silicon with nanoclusters of impurity gadolinium atoms seems to be very important, promising and necessary. In addition, the material has a good potential for creating magnetic devices, since gadolinium REE is by its nature a magnetic element.

In addition, there are also some difficulties in creating photosensitive integrated circuits and more efficient solar cells, such as making ohmic contacts. Due to the fact that nanoclusters of impurity gadolinium atoms are arranged in layers throughout the entire volume of the material, the problem of establishing a connection between the layers in the right sequence and their joint work is also an unsolved problem. Therefore, the work done and the results obtained are only the beginning of a large and relevant work, which will undoubtedly continue to develop and bring the expected results.

REFERENCES

1. Arora, S. Mourya, N. Singh, S. Kumar, R. Chandra, V. Malik, Coexistence of space charge limited and variable range hopping conduction mechanism in sputter-deposited Au/Sic metal–semiconductor–metal device. IEEE Trans. Electron Devices 70(2), 714–719 (2023)
2. S.K. Mourya, G. Malik, B. Kumar, R. Chandra et al., The role of non-homogeneous barrier on the electrical performance of 15r-Sic Schottky diodes grown by in-situ RF sputtering. Mater. Sci. Semicond. Process. 149, 106855 (2022)
3. Bakhadirkhanov M.K., Mavlonov G.Kh., Isamov S.B., Ayupov K.S., IlievKh.M., Sattorov O.E and Tachilin S.A. Photoconductivity of Silicon with Multicharged Clusters of Manganese Atoms [Mn]4. // Surface Engineering and Applied Electrochemistry, USA, 2010, Vol. 46. No.3, pp.276-280.
4. M. K. Bakhadyrkhanov, G. Kh. Mavlonov, S. B. Isamov, Kh. M. Iliev, K. S. Ayupov, Z. M. Saparniyazova, and S. A. Tachilin. Transport Properties of Silicon Doped with Manganese via Low-Temperature Diffusion. //Inorganic Materials, 2011, Vol. 47, No. 5, pp. 479–483.
5. Abdurakhmanov B.A., Ayupov K.S., Bakhadyrkhanov M.K., Olive H.M., Zikrillaev N.F., Saparniyazova Z.M. Low-temperature diffusion of impurities in silicon // Reports of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. 2010. Issue 4. pp. 32-36.
6. M.K. Bahadyrkhanov, K.S.Ayupov, H.M.Ivliev, P.Y. Krivenko, R.L. Khalmukhamedov, A.O. Abdulkhaev. Self-organization of impurity atoms in semiconductors. // Growth, properties and application of crystals. Materials of the 4th Republican scientific conference. Andijan, 2008. pp. 8-9.
7. K. Zeghdar, H. Bencherif, L. Dehimi, F. Pezzimenti, F.G. DellaCorte, Simulation and analysis of the forward bias current–voltage-temperature characteristics of W/4H-SiC Schottky barrier diodes for temperature-sensing applications. Solid State Electron. Lett. 2, 49–54 (2020)
8. M. Vivona, G. Bellocchi, R.L. Nigro, S. Rascunà, F. Roccaforte, Electrical evolution of W and WC Schottky contacts on 4H-SiC at different annealing temperatures. Semicond. Sci. Technol. 37(1), 015012 (2021)
9. G. Bellocchi, M. Vivona, C. Bongiorno, P. Badalà, A. Bassi, S. Rascuna, F. Roccaforte, Barrier height tuning in Ti/4H-SiC Schottky diodes. Solid-State Electron. 186, 108042 (2021).
10. Bakhadirkhanov M.K., Ayupov K.S., Mavlonov G.Kh. and Isamov S.B. Negative Magnetoresistance in Silicon with Manganese-Atom Complexes [Mn]4 . //Semiconductors. USA, 2010, Vol.44, No.9, pp.1145-1148.

STAND-ALONE SYSTEM ON RASPBERRY PLATFORM FOR MEASURING THE PARAMETERS OF PHOTOVOLTAIC MODULES IN REAL CONDITIONS

A. Gaevskii, V. Ivanchuk

Department of Renewable Energy Sources
NTUU 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', 37 Peremogy Ave.,
Kyiv, 03057, Ukraine, +380 44 204 8191
Institute for Renewable Energy NAS of Ukraine, 20A G. Khotkevycha St., Kyiv, 02094, Ukraine, +380 44 206 2809
a.gaevskii@kpi.ua, vlad.ivanchuk.13@gmail.com

The pilot stand-alone system is developed for determining photovoltaic module parameters (PVM). This system is designed on the Raspberry Pi microcomputer and allows for measuring the V-I characteristic and determining the key PVM parameters during several seconds in field conditions. These parameters referred to the one-diode PV cell equivalent circuit characterize the current operation characteristics of PV modules: their real maximal power, electrical losses and degradation degree.

Keywords: *PV module, V-I characteristic, equivalent circuits, determination of PV module parameters*

АВТОНОМНА СИСТЕМА НА ОСНОВІ ПЛАТФОРМИ RASPBERRY ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

О. Гаєвський, В. Іванчук

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», пр-т Перемоги, 37, м. Київ 03056, Україна, +380 44 204 8191,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України
вул. Гната Хоткевича 20-а, м. Київ 02094, Україна,
+380 44 206 2809

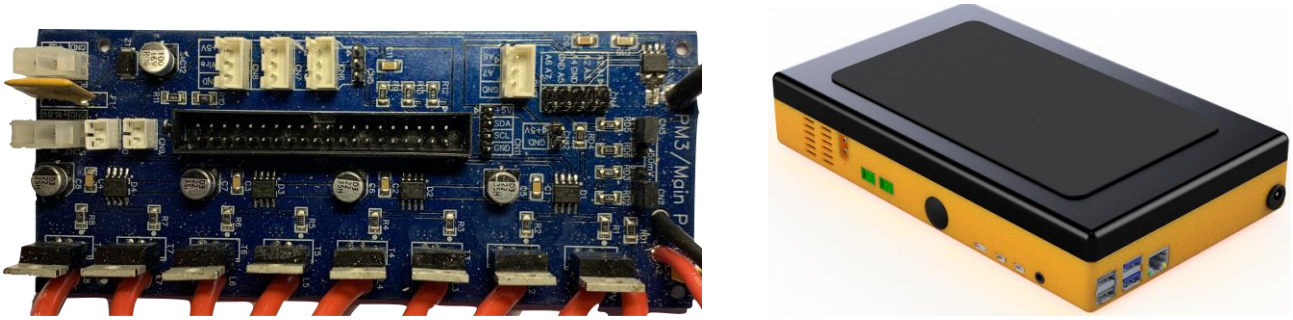
Пілотна автономна система розроблена для визначення параметрів фотоелектричних модулів (ФЕМ). Ця система розроблена на мікрокомп'ютерної платформі Raspberry Pi і дозволяє вимірювати V-I характеристику та визначати в польових умовах основні параметри ФЕМ у інтервалі декількох секунд. Ці параметри пов'язані із однодіодною схемою заміщення фотоелементів та характеризують поточні робочі характеристики ФЕМ: реальну максимальну потужність, електричні втрати та ступінь їх деградації.

Ключові слова: *фотоелектричний модуль, вольт-амперна характеристика, схеми заміщення, визначення параметрів фотомодуля.*

The efficiency of photovoltaic modules (PVM) as part of PV plants significantly depends not only on the level of solar radiation and temperature, but also on the ageing process during operation under real conditions. The result of PVM ageing under the influence of temperature fluctuations, high humidity, and intense irradiation is the degradation of their electrical characteristics, and a decrease in efficiency [1]. The system for measuring the actual parameters of the PVM can provide valuable information about the state and service life of arrays of PV modules, optimizing the operating modes of the photovoltaic power plant in the power system. The main parameters of the PVM, such as open-circuit voltage Voc, short-circuit current Isc and maximum power point Vm, Im, are measured by manufacturers under standard test conditions (STC). But to describe the current state of the PVM, especially after their long-term operation, it is necessary to know a more complete set of parameters that must be obtained directly at the PV plant. Under real operating conditions with varying radiation, PVMs rarely perform as well as they can under STC conditions, so PVM performance deviates from manufacturer specifications frequently. In this regard, an urgent task is the development of appropriate measuring systems, which include both hardware for operational measurements in the field and algorithms for processing measurement results and obtaining PVM parameters.

To date, PVM testing systems have been implemented on various microcontroller platforms [2]. In this work, the design and software of the measuring system were developed on the Raspberry Pi microcomputer, which makes it possible to autonomously process the experimental data and calculate the parameters of PVM in the field without using a computer and a web server at time intervals of several seconds.

In this work, the I-V curve tracking is achieved using two methods: capacitor charge cycling and a variable resistive load. These methods are realised on the basis of a Raspberry Pi microcomputer, which provides automatic data acquisition and calculates the PV parameters according to a developed algorithm for a time comparable to the tracking time. The elements of the stand-alone measuring system designed in our work are shown in Fig.1.



a *b*

Fig. 1. Main elements of the stand-alone measuring system design:
a - the control board for I-V tracking by variable resistance technology that hosts the set of relays controlled by a MOSFET, ADC and connectors for the resistance box and the PV capacitance charge control circuit;
b - the compact 3D-printed case for a device with sensor screen for control and results output

The measured data are processed by the program in Python which calculates the main PVM parameters. For convenient interaction with the software, the user Tkinter-interface for the touch I/O screen is developed.

In this work, testing of PVM various types was carried out in real conditions. As an example, Fig.2 shows two main stages of the measured data processing:

1. Pre-processing of the measured *I-V* samples (points in Fig. 2a) and the special piecewise polynomial approximation (blue curve on the same figure).

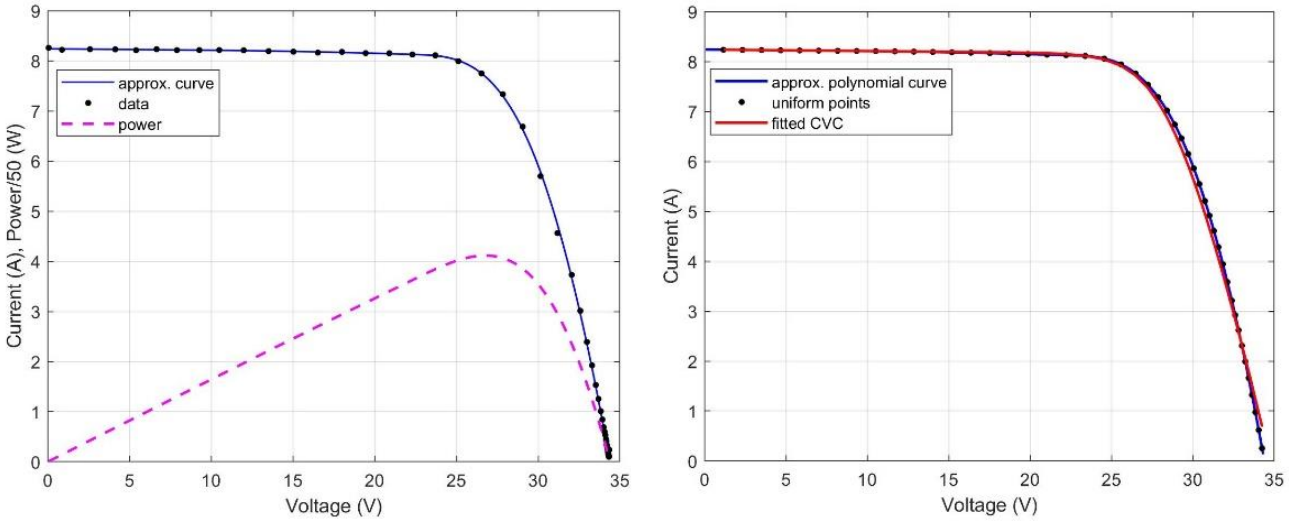
2. Uniform placement of points on the approximated curve (points of the blue curve in Fig. 2b), fitting the model function of the I–V characteristics (red curve) and determining the PVM parameters using the high-speed algorithm [3].

The graphs in Figure 2 show the results of processing the data for the module Risen 285 W at the irradiance of 730 W/m^2. The obtained parameter values are as follows: the photocurrent I_{ph} = 8.25 A, the reverse saturation current I_0 = 0.82·10^{-10} A, the diode non-ideal factor n = 2.67, the series and parallel loss resistances R_s = 0.55 Ohm and R_p = 334.14 Ohm, respectively.

The errors on these two optimization stages are estimated by the normalised root mean square error determined as

$$NRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N}\sum_k \left(I_{\mathrm{mod},k} - I_k\right)^2}}{I_{sc}}$$

where I_k – measured points (Fig. 2a) or uniformly located points on the polynomial approximant obtained on the 1st stage (Fig. 2b) and $I_{\mathrm{mod},k}$ – corresponding values on the approximative curve of the proper stage, I_{sc} – PVM short current. In this example, NRMSE=0.032 was obtained for the first stage, which characterizes experimental errors above all. For the second stage, NRMSE=0.018 was obtained, and this value characterizes the errors of the one-diode model and the parameters extracting algorithm.



a *b*

Fig. 2. Graph results of two optimization stages: a - measured I-V samples (black points), special piecewise polynomial approximant (blue curve) and power-voltage curve (dashed line); b - uniformly placed points on the approximant curve, fitting the model CVC (red curve)

REFERENCES

1. P. Manganiello, M. Balato, and M. Vitelli, “A survey on mismatching and aging of PV modules: The closed loop,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, vol. 62, no. 11, pp. 7276–7286.
2. M. Cáceres, A. Firman, J. Montes-Romero et al. Low-Cost I–V Tracer for PV Modules under Real Operating Conditions / Energies Aug. 2020, 13(17), 4320, doi:10.3390/en13174320.
3. A. Gaevskii. Method for Determining Parameters of PV Modules in Field Conditions, 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, Apr. 2019, p. 205-208, doi: 10.1109/ESS.2019.8764239.

ANALYSIS OF EXPERIMENTAL CHARACTERISTICS OF PHOTOELECTRIC MODULES USING A SINGLE-LED MODEL WITH VARIABLE PARAMETERS

A. Gaevskii, V. Ivanchuk

Department of Renewable Energy Sources
NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», pr. Peremogy, 37
Kyiv, 03057 Ukraine, +380 44 204 8191
Institute for Renewable Energy NAS of Ukraine, G. Khotkevicha str., 20A, Kyiv, 02094 Ukraine, +380 44 206 2809
a.gaevskii@kpi.ua, vlad.ivanchuk.13@gmail.com

***Abstract**. A theoretical model has been developed for determining the parameters of photovoltaic (PV) modules that change with load voltage, primarily the ideality factor A of the diode and the reverse saturation current I_0. It is well known that A of classical diode models [1] has a value from 1 to 2. Our results for industrial PV modules manufactured using PERC technology shows that in the voltage range below the maximum power point, the ideality factor can significantly exceed 2. The calculation of the current-voltage characteristics (CVC) for PV modules with variable parameters provides good agreement between theoretical and experimental data, namely, the normalized root mean square deviation is nRMSE ≈ 0.2%. Unlike the conventional multi-diode models with fixed parameters [2], the approach proposed in this paper provides a more adequate understanding of the recombination and resistive losses in PV elements.*

***Key words:** PV module, current-voltage characteristic, ideality factor, recombination, electrical losses.*

АНАЛІЗ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ВАХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ОДНОДІОДНОЇ МОДЕЛІ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, м. Київ 03056, Україна, +380 44 204 8191,
Інститут відновлюваної енергетики НАН України
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ 02094, Україна,
+380 44 206 2809
e-mail: a.gaevskii@kpi.ua, vlad.ivanchuk.13@gmail.com

***Анотація**. Розроблено теоретичну модель для визначення параметрів фотоелектричних модулів (ФМ), що змінюються залежно від напруги навантаження, насамперед коефіцієнта ідеальності діода A в схемі заміщення та зворотного струму насичення I_0. Добре відомо, що A в класичних моделях діода [1] має значення від 1 до 2. Наші дослідження промислових ФМ, вироблених за технологією PERC, показали, що в значному діапазоні напруги нижче точки максимальної потужності коефіцієнт ідеальності може значно перевищувати 2. Показано, що при розрахунку вольт-амперних характеристик (ВАХ) фотомодулів однодіодна модель зі змінними параметрами забезпечує добрий збіг теоретичних та експериментальних даних, а саме нормалізоване середньоквадратичне відхилення становить nRMSE ≈ 0.2%. Але на відміну від звичайних багатодіодних моделей з фіксованими параметрами [2] запропонований у цій роботі підхід дає більш адекватне уявлення про рекомбінаційні та резистивні втрати у фотоелектричних елементах.*

***Ключові слова:** вольт-амперна характеристика фотоелектричних модулів, визначення параметрів однодіодної моделі, коефіцієнт ідеальності, рекомбінація, резистивні втрати.*

Оцінка ефективності фотоелектричних модулів (ФМ) як генерувальних компонентів фотоелектричної системи необхідна при проєктуванні системи та під час її експлуатації. Поточний стан ФМ оцінюється в польових умовах здебільшого шляхом визначення їхніх параметрів. При цьому для адекватної діагностики ФМ потрібне знання ширшого набору параметрів, ніж той, що надається в паспортних даних ФМ. Розробці методу розрахунку таких параметрів на основі експериментальної ВАХ та їх залежності від напруги присвячена ця робота.

Основними фізичними факторами погіршення з часом ефективності ФМ є зростання резистивних втрат і впливу рекомбінаційних процесів на перетворення сонячного випромінювання на електричну енергію. Ці фактори достатньо глибоко досліджені теоретично й експериментально за багато років розвитку фотовольтаїки. Але слід визначити, що структури сучасних фотоелектричних елементів, технології їх виробництва суттєво відрізняються від простих структур, для яких була розроблена класична модель рекомбінації SRH [1], та наступні моделі, які на ній базуються. Ускладнення структури та технології виробництва ФМ призводять до відхилення параметрів від значень класичних моделей в широкому інтервалі напруги, передусім це стосується зворотного струму I_0 та коефіцієнта ідеальності A діоду в еквівалентній схемі заміщення [2].

Визначення параметрів фотомодулів дуже важливе для діагностики поточного стану ФМ, аналізу їх ефективності. У цій роботі розроблений новий метод розрахунку на основі ВАХ змінних з напругою повного набору параметрів ФМ. Вимірювання ВАХ здійснювалось в реальних зовнішніх умовах (сонячної радіації та температури) за допомогою автоматизованої системи вимірювання, раніше розробленої на платформі мікрокомп'ютера Rasberry Pi [3].

Аналізуючи ВАХ, необхідно розділити вклади двох типів втрат: рекомбінаційних та резистивних. Перші описуються в однодіодній моделі коефіцієнтом ідеальності A, другі – послідовним опором R_s [4]. Визначення цих параметрів базується на отриманій внаслідок аналізу експериментальних даних залежності темнового (діодного) струму I_d від напруги V та струму I через навантаження

$$I_d = I_0\left(e^{\frac{V+IR_s}{An_sV_T}} - 1\right) \tag{1}$$

де R_s – еквівалентний послідовний опір, n_s – кількість послідовно з'єднаних комірок ФМ. $V_T = k_BT/q$ – «теплова» напруга, k_B – стала Больцмана, q – заряд електрона. Суму цього рівня радіації (струму фотогенерації I_{ph}) визначаємо за отриманою в роботі формулою

$$R_s = \frac{1}{G_{oc}} - \frac{An_sV_T}{I_{ph}},\ G_{oc} = -\left.\frac{dI}{dV}\right|_{oc} \tag{2}$$

де G_{oc} – диференціальна провідність у точці холостого ходу.

На рис. 1 наведені дві розрахункові криві логарифму темнового струму I_d без розділення рекомбінаційного та резистивного вкладів (залежно від аргумента V) і з урахуванням тільки рекомбінаційного вкладу (аргументом є власне напруга на діоді V_d). Поведінка червоної кривої показує, що при напрузі в області точки максимуму потужності MPP і вище спостерігається постійний нахил, що збігається з уявленнями класичної моделі [1].

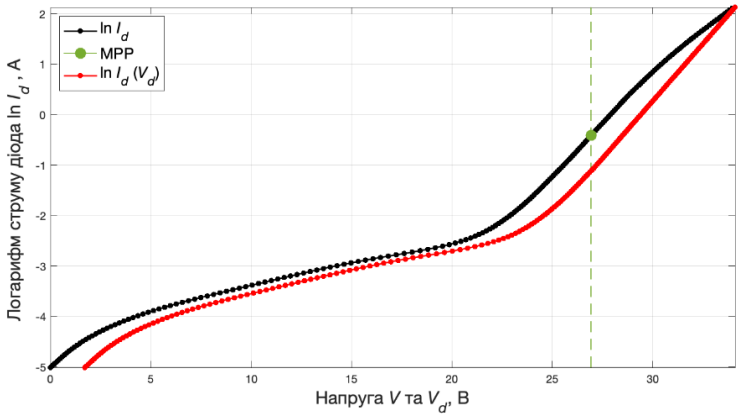


Рис. 1. Графік залежності логарифму темнового струму через pn-перехід ФМ від напруги на навантаженні (чорна лінія) й від напруги на діоді (червона лінія). Положення MPP показано зеленою точкою. Вимірювання для модуля Risen RSM60-6-280P при іррадіації 625 Вт/м², T = 23 ℃

На зразок показаних на рис. 1 отримують з даних сканування ВАХ у реальних погодних умовах протягом дуже коротких часових інтервалів (кілька секунд). Але при цьому наявні незначні флуктуації освітленості приймальної поверхні модуля. Для зменшення їхнього впливу був розроблений адаптивний алгоритм фільтрації та згладжування даних, заснований на ковзних медіанних середніх.

Вираз для змінного коефіцієнта A через нахил дотичної до логарифмічної кривої діодного струму та для логарифму зворотного струму насичення $ln\ I_0$ виглядають так:

$$A(V_d) = \left[n_s V_T \frac{d \ln I_d(V_d)}{dV_d} \right]^{-1}, \quad \ln I_0 = \ln I_d - \frac{V_d}{A n_s V_T}. \tag{3}$$

Графіки залежності $A(V_d)$ показані на рис. 2. Розрахунок коефіцієнта ідеальності за формулою (3) дозволяє отримати більш правильні, на наш погляд, значення в області $V > V_{MPP}$ (червона лінія), ніж через залежність $\ln I_d(V)$.

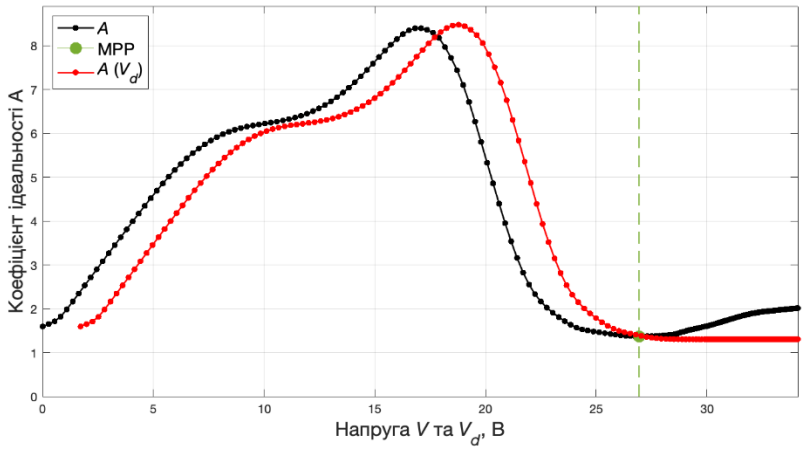


Рис. 2. Залежність коефіцієнта ідеальності від напруги на навантаженні (чорна лінія) та від напруги на діоді (червона лінія), що отримана для графіків на рис. 1

Поведінка кривої $ln\ I_d\ (V)$ за великої напруги нагадує поведінку логарифмічної залежності в моделі SRH [1], однак значення коефіцієнта A в області невисокої інжекції носіїв при $V < V_{MPP}$ (точніше <23 В або 0.38 В на комірку), де суттєвий вплив рекомбінації, в кілька разів більше значень A класичної моделі в більшу сторону. Такі значення коефіцієнта ідеальності, які були отримані також у кількох роботах інших авторів (див. [5] та посилання в статті), можуть спостерігатись у ФЕ з мікроструктурними та поверхневими дефектами.

З використанням отриманих змінних параметрів ФМ у роботі розраховується ВАХ як рішення нелінійного рівняння на відміну від загальноприйнятого підходу розрахунку [2] модельної ВАХ внаслідок підганяння параметрів з постійними значеннями під експериментальні відліки *(I,V)*. Модель демонструє гарний збіг з експериментом: для отриманих $A(V_d)$, $lnI_0(V_d)$ за формулами (3) розрахунок ВАХ дає нормалізоване середнє квадратичне відхилення струму від експериментальних значень *nRMSE* = 0.00207. Для порівняння традиційна процедура підганяння сталих за напругою параметрів однодіодної моделі під експеримент в наведеному прикладі становила *nRMSE* = 0.00367.

ПОСИЛАННЯ

1. W. Shockley and W. T. Read, “Statistics of the recombinations of holes and electrons”, Physical Review, vol. 87, no. 5, pp. 835–842, Sep. 1952, doi: 10.1103/physrev.87.835.
2. B. Maniraj and A. P. Fathima, “Parameter extraction of solar photovoltaic modules using various optimization techniques: a review”, Journal of Physics Conference Series, vol. 1716, no. 1, p. 012001, Dec. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1716/1/012001.
3. О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук, «Автономна система вимірювання на основі мікрокомп’ютера для тестування фотоелектричних модулів». Відновлювана енергетика, вип. 3(70), с. 54–61, Січ 2023, doi: 10.36296/1819-8058.2022.3(70).54-61.
4. О. Ю. Гаєвський, В. Ю. Іванчук, «Моделювання ВАХ фотоелектричного модуля зі змінними фактором ідеальності та зворотним струмом насичення». Відновлювана енергетика, вип. (78), с. 54–61, Вер 2024, doi: 10.36296/1819-8058.2024.3(78).54-61.
5. O. Breitenstein, “Understanding the current-voltage characteristics of industrial crystalline silicon solar cells by considering inhomogeneous current distributions”, Opto-Electronics Review, vol. 21, no. 3, Jan. 2013, doi: 10.2478/s11772-013-0095-5.

СИНТЕТИЧНІ РЯДИ ДОБОВОЇ ІНСОЛЯЦІЇ ДЛЯ ЗАДАЧ ОПТИМІЗАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

О. Гаєвський[1, 2], Г. Гаєвська[1]

1НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ 03056, Україна, +380 44 204 8191,
2Інститут відновлюваної енергетики НАН України
вул. Гната Хоткевича 20-а, м. Київ 02094, Україна, +380 44 206 2809
a.gaevskii@kpi.ua

***Анотація**. При розрахунках фотоелектричних систем (ФЕС) використовують зазвичай усереднені багаторічні дані з сонячної радіації для певного регіону. На відміну від цього підходу запропоноване при розрахунках ФЕС багатократне генерування синтетичних рядів добової інсоляції, які відтворюють короткочасні автокореляційні процеси змінення інсоляції в реальному діапазоні середньоквадратичних відхилень від усереднених значень. Показано, що синтетичні ряди пікових сонячних годин PSH(n) є найкориснішим інструментом при вирішенні задач оптимізації компонентного складу автономних та резервних систем енергозабезпечення з високою надійністю.*

***Ключові слова:** фотоелектричні системи (ФЕС), резервні ФЕС, інсоляція, автокореляційна модель, синтетичні часові ряди.*

SYNTHETIC DAILY INSOLATION SERIES FOR OPTIMIZATION PROBLEMS OF PV SYSTEMS

O. Gaevskii[1, 2], H. Gaevska[1]

1Department of Renewable Energy Sources NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Beresteysky pr. 37 Kyiv, 03057 Ukraine,
+380 44 204 8191
2Institute for Renewable Energy NAS of Ukraine, G. Khotkevicha str., 20A, Kyiv, 02094 Ukraine, +380 44 206 2809
a.gaevskii@kpi.ua

***Abstract**. Solar radiation data for a certain region averaged over many years are usually used in sizing problems of photovoltaic systems (PVS). In contrast to this approach, this paper proposes multiple generation of synthetic series of daily insolation for PVS calculations. These series reproduce short-term autocorrelation processes of insolation changes in the real range of standard deviations from the average values. It is shown that synthetic series of peak sun hours PSH(n) are the most useful tool in solving sizing problems of standalone and backup PVS with high reliability.*

***Keywords**: PV systems, backup PV plant, insolation, autocorrelation model, synthetic time series.*

Для визначення оптимального компонентного складу системи під час комп'ютерних розрахунків ФЕС потрібні послідовності даних про добові та погодинні надходження сонячної радіації, які відповідають заданому навантаженню та забезпечують необхідну надійність електропостачання. При моделюванні сонячної радіації зазвичай використовують однорічний метеорологічний ряд для умов типового метеорологічного року [1]. Внаслідок цього при проєктуванні ФЕС не будуть враховані найгірші радіаційні умови, які можуть виникати при експлуатації. Тому для техніко-економічного обґрунтування необхідно враховувати кілька сценаріїв розвитку ймовірнісних подій. Реалізація таких сценаріїв можлива шляхом генерування синтетичних даних щодо надходження сонячного випромінювання на приймальні поверхні [2–4].

Розподіл відхилень щоденної інсоляції від середніх значень не підпорядковується нормальному закону: їх інтервальні частоти описуються зазвичай несиметричною гістограмою [3, 4]. Крім того, послідовний експериментальний ряд відхилень характеризується значною автокореляцією. Позначимо добову інсоляцію на одиницю площі за день як $E(n, j)$, де n (n = 1,..N) – номер дня спостереження, j (j = 1,..J) – індекс року. Випадкову величину $E(n, j)$ представляємо сумою середньодобового значення $\mu(n)$, отриманого усередненням за J років і відхилення від нього [3]:

$$E(n, j) = \mu(n) + \sigma(n)X(n, j). \quad (1)$$

Десь відхилення описується добутком короткочасного добового збудження $X(n, j)$ на середньоквадратичне відхилення (СКВ) $\sigma(n)$. Часові ряди $X(n, j)$ утворюють стаціонарний Марковський процес та у певному наближенні можуть бути описані автокореляційною моделлю першого порядку:

$$X(n, j) = \rho X(n-1, j) + Y(n, j), \quad (2)$$

де $Y(n, j)$ – «залишки», ρ – коефіцієнт кореляції. Приклад емпіричного розподілу частот випадкової величини X та функція розподілу $F(X)$ показані на рис. 1. Значення $F(X)$ у цій роботі застосовуються для генерації синтетичних часових рядів інсоляції. Для цього вводимо новий часовий ряд $Z(n, j)$, який зберігає структуру авторегресійного процесу першого порядку з тією самою кореляцією ρ:

$$Z(n, j) = \rho Z(n-1, j) + U(n, j), \quad (3)$$

де $U(n, j)$ – незалежна випадкова змінна зі стандартним нормальним розподілом. Далі за допомогою наступного інтегрального перетворення знаходиться ряд $X(n,j)$ із заданим несиметричним негаусовим розподілом [3]:

$$\mathrm{erf}(Z) = F(X), \quad (4)$$

де erf – функція похибок.

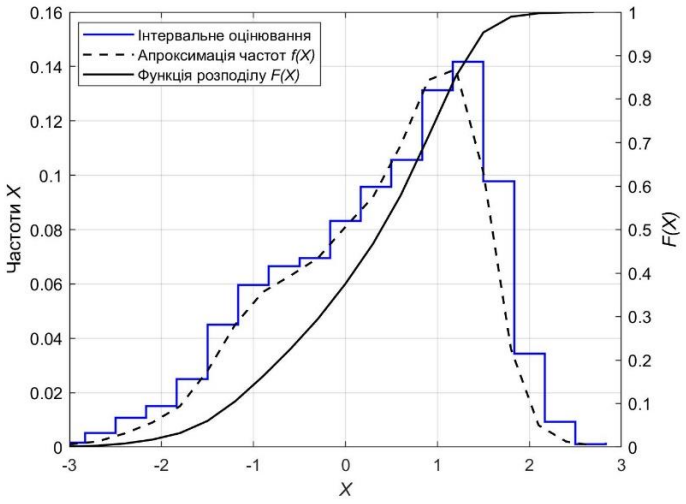


Рис. 1. Емпіричні характеристики типового часового ряду збуджень X(n) в середньо-європейських широтах: інтервальні оцінки частот X (синя східчаста лінія); щільність розподілу f(X) (штрихова лінія); кумулятивна функція розподілу F(X) (чорна крива)

Для розрахунків синтетичних рядів можуть використовуватись бази даних платформи PVGIS [5] або дані регіональних метеостанцій. Наші розрахунки базувались на довідникових даних з інсоляції та СКВ для певних регіонів України в типовий день кожного місяця [6]. Інтерполювання цих даних на кожен день року дає середньодобові значення $\mu(n)$ і $\sigma(n)$. Коефіцієнт кореляції ρ між зміненнями інсоляції в сусідні дні вважався 0,3−0,35, що відповідає радіаційним умовам у середньо-європейських широтах [3, 4]. Ряд $X(n, j)$ має асиметричний розподіл частот (рис. 1), вигляд якого незначно відрізняється для різних регіонів країни [3, 4].

Випадкове добове надходження радіації $E(n, j)$ на горизонтальну поверхню (синтетичний ряд інсоляції) розраховувалось за формулою (1). При цьому добові збудження $X(n, j)$ визначались як відображення (3) авторегресійного ряду $Z(n, j)$ (4) на функцію розподілу $F(X)$. Генерація послідовності $Z(n, j)$ здійснювалась з початкового дня (n = 1, j = 1) з додаванням нормального шуму $U(n, j)$ (4). Після знаходження $X(n, j)$ визначався синтетичний ряд (1) з конкретними (не усередненими) значеннями добової інсоляції $E(n,j)$. При комп'ютерному моделюванні рядів $E(n, j)$ можна вважати, що кожна реалізація (кожен запуск програми) відповідає різним рокам j = 1,..J.

Синтетичні ряди інсоляції необхідні при рішенні задач оптимізації компонентного складу фотоелектричних систем, призначених для автономного або резервного живлення споживача. Ці ряди можуть відображати екстремальні ситуації недостатньої фотогенерації у несприятливі сезони року. Саме для цих періодів мають визначатись установчі розміри системи (загальні потужність ФМ та ємність акумуляторів). Прямим способом застосування синтетичного ряду добової інсоляції є прив'язка виробітку ФЕС до профілю $PSH(n)$ – піковим сонячним годинам (на кожну добу). На рис. 2 показаний приклад синтетичного часового ряду $PSH(n)$ для найбільш несприятливих з погляду інсоляції осінньо-зимових місяців, який побудований за описаним вище методом.

Отримані залежності *PSH*(*n*) можуть використовуватись при розрахунках автономних та резервних систем енергозабезпечення з підвищеними показниками надійності. Методи розрахунків ФЕС із застосуванням профілю *PSH*(*n*) описані в літературі (див., наприклад, [7, 8]).

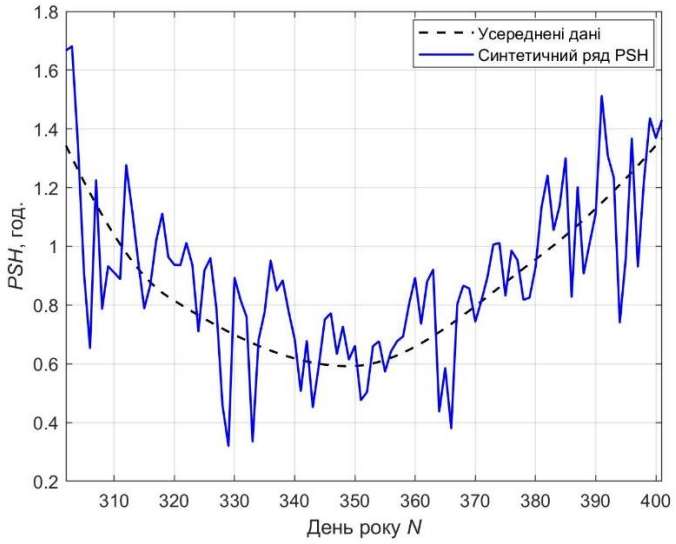


Рис. 2. Профіль PSH(n) для м. Бориспіль Київської обл. в період найменшої інсоляції з 29 жовтня по 5 лютого (100 днів). Розрахунки для приймальної поверхні з кутом нахилу 35°, орієнтацією на південь: усереднений профіль PSH, побудований на основі довідникових даних [6] (штрихова лінія); синтетичний профіль (синя крива), розрахований на основі довідникових значень σ(n) та авторегресійного ряду X(n) з характеристиками, наведеними на рис. 1

ПОСИЛАННЯ

1. Generation of a typical meteorological year (No. SAND-78-1096C; CONF-780639-1). Sandia Labs., Albuquerque, NM (USA). https://www.osti.gov/biblio/7013202
2. D. Laslett, C. Creagh, Ph. Jennings. A method for generating synthetic hourly solar radiation data for any location in the south west of Western Australia. Renewable Energy. 2014. V. 68. Pp. 87–102. https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.01.015.
3. U. Amato, A. Andretta, B. Bartoli et al. Markov processes and Fourier Analysis as a tool to describe and simulate daily solar irradiance. Solar Energy. 1986 V. 37. No. 3. Pp. 179–194. https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90075-7.
4. J. M. Gordon, T. A. Reddy. Time series analysis of daily horizontal solar radiation. Solar Energy. 1988. V. 41. No. 3. Pp. 215–226. https://doi.org/10.1016/0038-092X(88)90139-9.
5. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en.
6. Scientific and applied reference book on the climate of the USSR. Ukrainian SSR. Issue 10. Parts 1–6, Book 1. L: DMI, 1990. 605 p.
7. А. Н. Гаевская, А. Ю. Гаевский. Разработка программного обеспечения для оптимизации параметров фотоэлектрических станций. II. Компонентный состав станции в зависимости от угла наклона фотомодулей. Відновлювана енергетика. 2017. № 3(50). С. 22–34.
8. M. Abed, A. Reddy, T. R. Jyothsna, N. Mohammed. Optimal sizing and performance assessment of stand-alone PV systems using optimum hybrid sizing strategy. Results in Engineering. 2025. V. 25. 103793, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103793.

УДК 620.91

КОМБІНОВАНІ СОНЯЧНІ МОДУЛІ – ТЕПЕРІШНЄ І МАЙБУТНЄ

В. І. Шевчук, В. О. Пундєв, І. О. Шейко

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ 02094, Україна
Тел.:(044) 206-28 09, e-mail renewable@ukr.net

Запропоновані окремі виправлення в термінології щодо фотовольтаїки. Коротко охарактеризовані й окремі типи комбінованих модулів, які випускаються в світі. Сформовано блок-схему щодо варіантів конструктивно-технологічних рішень для комбінованих сонячних модулів з напрямами діяльності, які запропоновано взяти до уваги розробникам.

Ключові слова : *комбінований сонячний модуль, сонячні елементи, поглинальна панель.*

COMBINED SOLAR MODULES TODAY AND IN THE FUTURE

V. Shevchuk, V. Pundiev, I. Sheiko

Institute of renewable energy NASU
Metrolohichna street, 50, Kyiv, 03143, Ukraine
Phone/fax: +38-(044)-206-28-09 e-mail: renewable@ukr.net

Some corrections to the terminology of photovoltaics are proposed. Some types of combined modules produced in the world are also briefly described. A flowchart of design and technological solutions for combined solar modules with areas of activity that are proposed to be taken into account by developers has been formed.

Keywords: *combined solar module, solar cells, absorber panel.*

ORCID: 0000-0002-4176-7799

ORCID: 0000-0003-3750-8812

ORCID: 0000-0002-5770-3677

Серед всього різноманіття фотоелектричних модулів (ФЕМ), які виробляються на сьогодні світовою промисловістю, особливу нішу займають комбіновані фотоелектричні модулі (КФЕМ) і, як вважаємо, вони досі є недооціненими, хоча останніми роками спостерігається зростання інтересу до них на світовому ринку.

Почнемо з термінології. Згідно з ДСТУ 7503:2014 «Геліоенергетика. Станції фотоелектричні. Терміни та визначення понять» [1] комбінований фотоелектричний модуль – це «фотоелектричний модуль, який має систему відводу теплоти від сонячних елементів з метою її корисного використання». У широковживаній літературі їх називають порізному: комбінований фотоелектричний модуль, гібридний модуль, враховуючи те, що він конструктивно є комбінацією фотоелектричного модуля й теплового колектора, PV/T колектор, тому що зазвичай в ньому більше виробляється теплової енергії, ніж електричної. А, з погляду авторів, з метою уникнення плутанини, їх краще було б називати комбінованими сонячними модулями.

Особлива увага до КФЕМ пов’язана з тим, що оскільки електрична ефективність найрозповсюдженіших на сьогодні фотоелектричних модулів знижується з підвищенням температури фотоелектричних елементів, то рідина, яка омиває фотоелементи в комбінованому модулі, здійснює подвійну роботу – не лише утилізує тепло, а й охолоджує їх, завдяки чому запобігає зниженню електричного ККД за умов зростання температури. І ще позитивним в КФЕМ є те, що амплітуда коливань температури сонячних елементів у них протягом року буде значно меншою у порівнянні зі звичайним ФЕМ, а це дає підстави стверджувати, що термін використання КФЕМ не тільки не буде поступатись ФЕМ, а навіть перевищуватиме його. Крім того, пересічні користувачі КФЕМ, насамперед в приватних будинках, а інколи і в комунальних закладах (лікарні, дитсадки тощо) чи на підприємствах, де в технологічному циклі використовується як електроенергія, так і нагрів води, потребують «два в одному» (екологічно чисту електричну енергію і теплу воду) від однієї встановленої батареї сонячних модулів.

На сьогоднішній день можна назвати цілу низку комбінованих модулів, які випускає світова промисловість – це Dual Sun Spring виробництва Франції, Solimpeks турецького виробництва [2], PVT Solar китайського виробництва

тощо, що мають конструктивні особливості, а також свої переваги й недоліки. Так, французькі виробники максимальну увагу приділили теплообміннику, який характеризується мембранним ефектом та ефектом пористості матеріалу, розробка ж турецьких фахівців характеризується простотою поглинальної панелі із застосуванням класичних матеріалів (мідь), які витримують тиск у 8 Bar. Розробка, наприклад, голландських фахівців [3] вирізняється тим, що з фронтальної сторони першою зустрічає сонячне випромінювання рідина (теплова частина), а потім – фотоелектрична, яку своєю чергою знов омиває ця рідина, і далі вона вже виводиться через вивідні патрубки. Інакше кажучи, в цьому відгалуженні сонячної енергетики має місце окремий напрям розвитку, який потребує упорядкування.

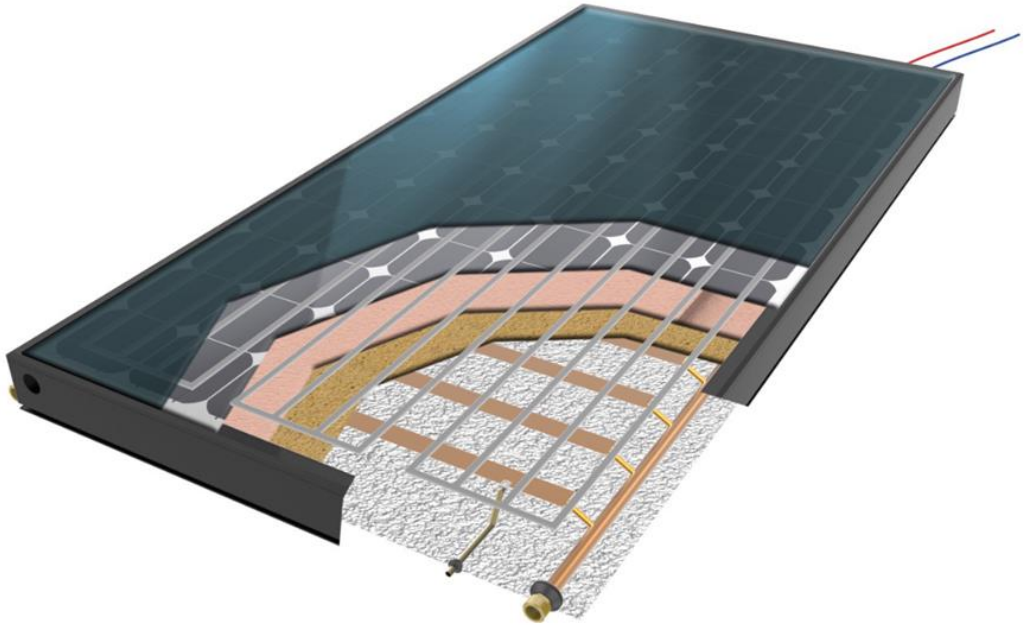


Рис. 1. Комбінований сонячний модуль у розрізі

Для кращого розуміння надамо конструктивну (функціональну) характеристику основних складових плаского комбінованого фотоелектричного модуля (рис. 1).

Він складається з:

а) рами для забезпеченння міцності та жорсткості конструкції з можливістю витримувати фізичні й кліматичні (вітрові, снігові тощо) та інші можливі навантаження;

б) фронтального прозорого покриття, яке має високий коефіцієнт прозорості для ефективного проникнення сонячного випромінювання;

в) поглинальної й одночасно тепловідвідної панелі з високоефективним селективним покриттям, яка в свою чергу містить трубопроводи з вхідними та вихідними патрубками, що слугують для циркуляції охолоджувальної рідини, і прикріпленими до неї з фронтальної сторони сонячними елементами;

г) теплоізоляції, розташованої між тильним покриттям і поглинальною панеллю, яка слугує для обмеження втрат теплової енергії від поглинальної панелі в навколишнє середовище;

д) тильного покриття;

е) ущільненого та герметичного покриття сонячних елементів всередині модуля, які визначають певною мірою технічний ресурс модуля.

Окремою складовою модуля може бути охолоджувальнаа рідина або газ, що циркулює по трубопроводах або каналах поглинальної панелі.

Аналіз відомих модифікацій КФЕМ та шляхи можливого їх подальшого розвитку представлено на рис. 2. Ця блок-схема надає узагальнювальну картину існуючих та можливих варіантів конструктивно-технологічних виконань комбінованих фотоелектричних модулів.

Різні типи сонячних елементів мають різні теплові коефіцієнти, тому вони по-різному реагують на зміну температури. Так, на сьогоднішній день найдоцільніше застосовувати сонячні елементи на базі **c-Si** у виробництві КФЕМ [4].

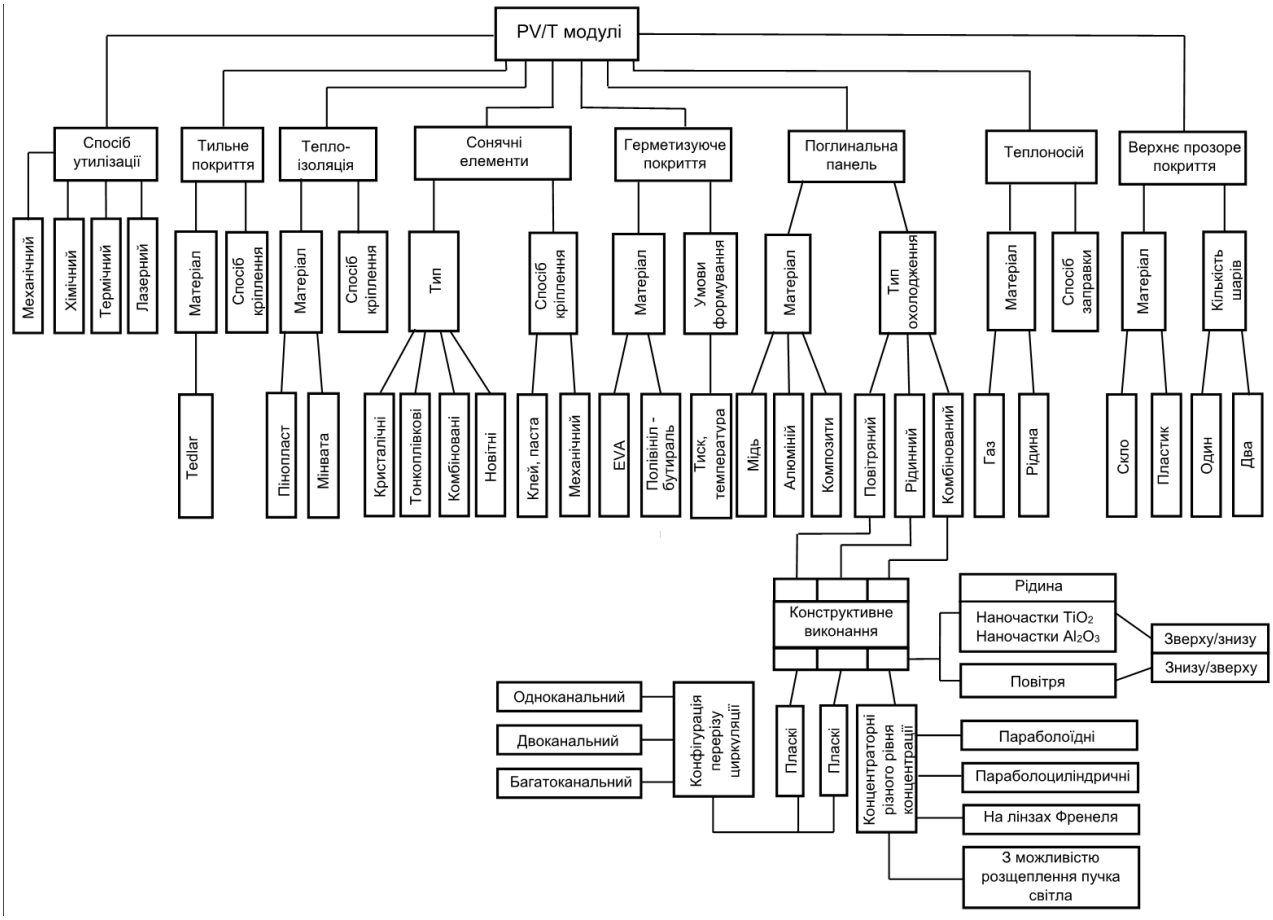


Рис. 2. Блок-схема варіантів конструктивно-технологічних рішень КФЕМ

Особливу увагу з погляду екологічності слід було б приділити питанням герметизації та способу кріплення сонячних елементів до поглинальної панелі. Це впливає не тільки на теплопередачу й довговічність модулів, а і на відсоток раціональної утилізації модулів, оскільки під час утилізації його доводиться розривати шляхом випалювання заради економічності.

Тильне покриття, що впливає на механічну міцність модуля, і його теплоізоляція меншою мірою впливають на теплову складову, ніж верхнє прозоре покриття та електротеплові характеристики сонячних елементів і поглинальної панелі через наявність конвективної складової, але це також потрібно враховувати.

Окреме місце в блок-схемі приділяється питанням утилізації *комбінованих модулів*, частка якої лише щодо *фотоелектричних модулів* становить близько 95 %, бо наявність прикріплених до поглинальної панелі сонячних елементів тільки ускладнює цю задачу

Примітка 1. На блок-схемі вказується кількість шарів верхнього прозорого покриття. Тут маються на увазі групи КФЕМ, які дають змогу отримувати більше теплової або електричної енергії.

Примітка 2. Матеріали, з яких виготовляється поглинальна панель, суттєво впливають на теплові та електричні характеристики модуля.

Питання гнучкості роботи модуля базується на регулюванні електричною енергією параметрів теплової енергії, а тепловий параметр (швидкість циркулюючої рідини або вхідної температури) регулює об’єми електричної енергії.

Висновки:

1. Зображена на рис. 2 блок-схема відрізняється від інших підходом, зокрема щодо погляду на основний склад комплектуючих модуля. Вона показує, що на сьогодні більшість робіт щодо удосконалення КФЕМ проводиться в напрямі удосконалення конструктиву поглинальної панелі; пошуку відповідної нанорідини, що циркулює в модулі; можливості зручного розщеплення пучка світла на певні довжини хвиль і подальшого підлаштування під ці хвилі відповідних сонячних елементів.

2. У схемі наявні нові підпункти (наприклад, способи кріплення сонячних елементів до поглинальної панелі, способи утилізації КФЕМ тощо).

3. Схема, яка пропонується авторами, може бути уточнена й доповнена і може бути застосована для створення нових КФЕМ або в навчальному процесі стосовно відповідної тематики з відновлюваної енергетики в навчальних закладах.

ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 7503:2014 «Геліоенергетика. Станції фотоелектричні. Терміни та визначення понять». Введ. 01.01. 2015. К.: Держспоживстандарт України, 2015.
2. http: solimpeks. com
3. M. Bakker, H. A. Zondag, W.G.J. van Helden «Design of a dual flow photovoltaic/thermal combi panel» Energy Research Centre of the Netherlands ECN.
4. Virtuani, D. Pavanello, and G. Friesen «Overview of temperature coefficients of different thin film photovoltaic technologies».

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАЦІЇ НА ПРИКЛАДІ МІСТА ОДЕСИ

М. Д. Сильнягін

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна

У роботі проведено комплексний аналіз потенціалу використання сонячної електрогенерації в місті Одесі. Аналіз базується на метеорологічних даних, отриманих з місцевої метеостанції, зокрема даних про сонячну радіацію, температуру та інші параметри, які впливають на ефективність роботи сонячних електростанцій. За допомогою сучасних засобів обробки даних побудовано графіки, що демонструють сезонні та денні коливання параметрів. Основною метою дослідження є виявлення оптимальних періодів для експлуатації сонячних електростанцій та оцінка їхнього потенціалу з економічного та енергетичного погляду. Отримані результати дозволяють сформувати практичні рекомендації щодо розміщення та експлуатації сонячних електростанцій у місті Одесі.

Ключові слова : *сонячна енергія, відновлювана енергетика.*

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF USING SOLAR POWER GENERATION ON THE EXAMPLE OF ODESA CITY

M. Sylniahin

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine

This paper presents a comprehensive analysis of the potential for solar power generation in the city of Odesa. The analysis is based on meteorological data obtained from the local weather station, including data on solar radiation, temperature, and other parameters that affect the efficiency of solar power plants. Using modern data processing tools, graphs showing seasonal and daily fluctuations in the parameters were created. The main goal of the study is to identify the optimal periods for the operation of solar power plants and to assess their potential from the economic and energy points of view. The obtained results allow us to formulate practical recommendations for the location and operation of solar power plants in the city of Odesa.

Keywords: *solar energy, renewable energy.*

ORCID: 0009-0001-7826-5776.

Вступ. Сучасний стан використання відновлюваної енергетики

Сучасний енергетичний сектор стикається з необхідністю пошуку альтернативних джерел енергії, що сприяє зниженню залежності від традиційних викопних палив та зменшенню викидів парникових газів. Сонячна енергія – один з найперспективніших напрямів розвитку відновлюваної енергетики з огляду на її доступність та екологічну безпечність.

Місто Одеса завдяки своєму розташуванню та сприятливим кліматичним умовам має значний потенціал для впровадження сонячних електростанцій. Аналіз метеорологічних даних, як-от сонячна радіація, температурні коливання та хмарність, дозволяє оцінити ефективність використання сонячної енергії в регіоні.

Аналіз метеорологічних даних

У роботі проведено аналіз метеорологічних даних міста Одеса за п’ятирічний період з погодинними інтервалами отриманих даних, що включає сонячну інсоляцію та температуру повітря. Графіки, наведені нижче, ілюструють сезонні та міжрічні варіації цих параметрів, що є ключовими для оцінки потенціалу використання сонячної електрогенерації.

Сонячна інсоляція демонструє характерні сезонні коливання, максимальні значення спостерігаються в літні місяці, коли тривалість світлового дня найбільша, а мінімальні – у зимовий період. Щорічна амплітуда інсоляції залишається стабільною, проте окремими роками спостерігаються незначні відхилення, що можуть бути спричинені змінами хмарності та атмосферних умов.

Температура повітря також має виражений сезонний характер, що корелює з сонячною інсоляцією. Влітку середньомісячні температури досягають максимальних значень, що сприяє ефективному перетворенню сонячної енергії на електричну. Водночас високі температури можуть впливати на ефективність роботи фотоелектричних панелей, оскільки підвищене нагрівання знижує їхню продуктивність. У зимові місяці середня температура повітря значно нижча, що може впливати на загальну ефективність сонячних установок, проте при цьому холодні умови можуть сприяти підвищенню коефіцієнта корисної дії (ККД) сонячних панелей.

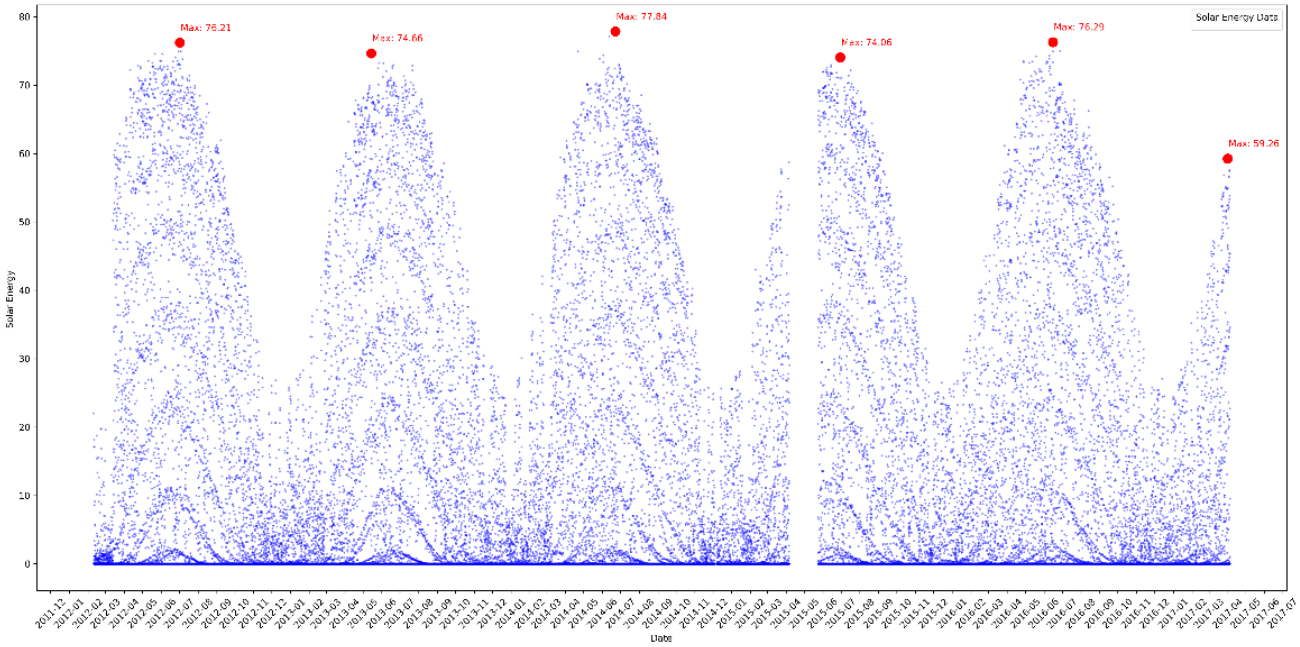


Рис. 1. Графік сонячної інсоляції

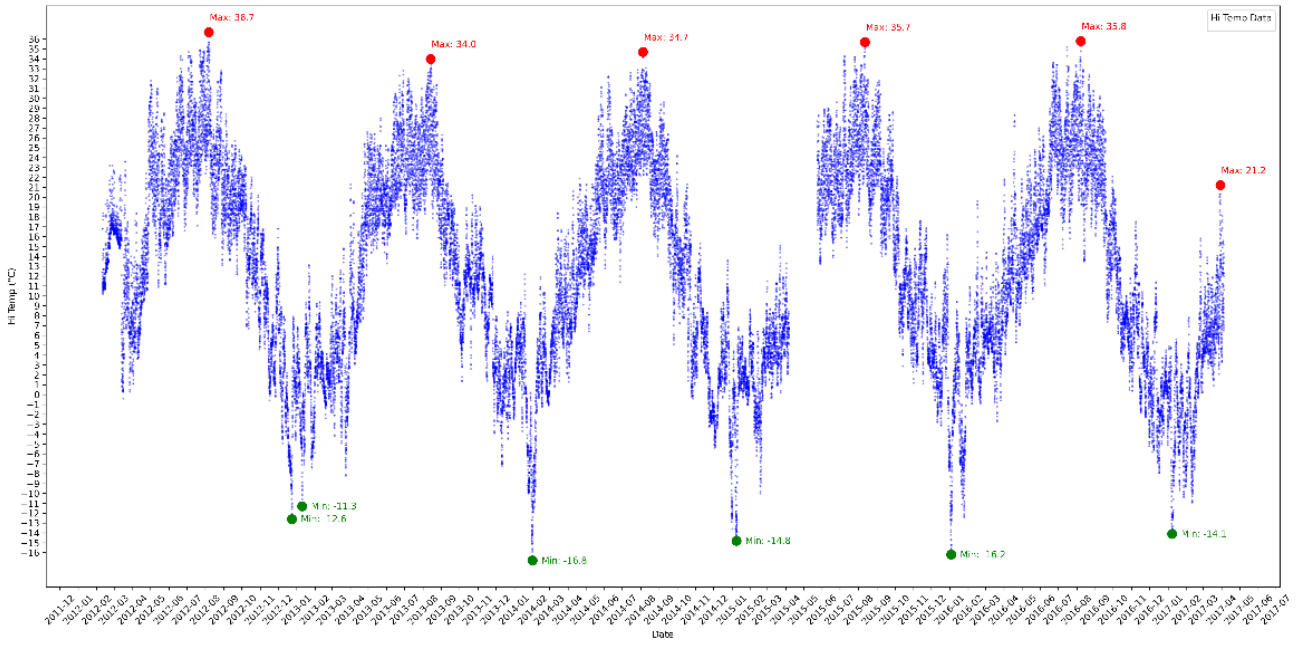


Рис. 2. Графік максимальної добової температури

На першому графіку зображено зміни рівня сонячної енергії, отриманої за день, протягом п’ятирічного періоду. Також простежується чітка сезонна періодичність: максимальні рівні сонячної інсоляції (позначені червоними маркерами) припадають на літні місяці й сягають **74–78 одиниць**, тоді як зимові значення є значно нижчими. Окремі періоди зниженого рівня інсоляції можуть бути спричинені хмарністю, атмосферними опадами чи іншими метеорологічними чинниками. Другий графік ілюструє зміни максимальної добової температури повітря в місті Одесі за досліджуваний період. Спостерігається чітка сезонна періодичність: літні максимуми досягають значень у межах

34–37 °C, тоді як зимові мінімуми опускаються до -12…-16 °C. Виділено екстремальні значення температури: червоними маркерами позначені річні максимуми, а зеленими – мінімуми.

На графіках видно, що навіть за проміжок у п’ять років коливання сонячного випромінювання можуть бути передбачуваними, що дає змогу чітко прорахувати кількість виробленої енергії за наявності даних про номінальну потужність сонячної панелі, що своєю чергою дозволяє точно розрахувати термін окупності електростанцій.

Висновок

Отримані дані свідчать про високий потенціал Одеської області для використання сонячної енергетики, особливо у весняно-літній період. Результати дослідження підтверджують доцільність розвитку сонячної енергетики в регіоні, а також необхідність подальшого моделювання та оптимізації параметрів роботи фотоелектричних систем з урахуванням локальних метеорологічних умов.

ПОСИЛАННЯ

1. Басок Б. І., Новіцька М. П., Кравченко В. П. Прогнозування інтенсивності сонячного випромінювання на основі штучних нейронних мереж. Теплофізика та теплоенергетика. 2021. Т. 43, № 2. С. 60–67. https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2021.7
2. Марченко, В. М. Гуменюк, Б. Є. Перспективи розвитку сонячної енергетики в Україні URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/55134
3. Heffron, R., Halbrügge, S., Körner, M.-F., Obeng-Darko, N.A., Sumarno, T., Wagner, J., Weibelzahl, M. (2021). «Justice in solar energy development». Solar Energy. Vol. 218. Pp. 68–75. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X21000980.
4. Annual relative performance degradation in photovoltaic solar plants. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266711312400024X

УДК 621.3

ВИКОРИСТАННЯ ГІБРИДНОГО ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ТЕПЛОВОГО КОЛЕКТОРА ТА ЕЛЕКТРОЛІЗЕРА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ

Д. В. Бондаренко[1], О. С. Дьяченко[2]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м.Київ, Україна,
тел: 38(050)972999, e-mail: dima7007bond@gmail.com

З огляду на потреби виробництва зеленого водню з відновлюваних джерел енергії в роботі запропоновано використання гібридного фотоелектричного теплового колектора, до якого підключено електролізер. Було встановлено, що для використання найперспективнішого електролізера з протонообмінною мембраною як сировина необхідна підігріта вода, для чого поряд з фотоелектричним джерелом електричної енергії зручно використовувати теплову частину гібридного колектора. Для розрахунків та моделювання представленої системи зручно застосовувати електричні моделі. У роботі запропоновано електричну модель гібридного фотоелектричного теплового колектора, до якого підключено електролізер.

Ключові слова: *сонячна енергія, водень, гібридний фотоелектричний тепловий колектор, електролізер, моделювання, електрична модель.*

USE OF A HYBRID PHOTOELECTRIC THERMAL COLLECTOR AND ELECTROLYZER FOR HYDROGEN PRODUCTION

D. Bondarenko[1], O. Diachenko[2]

Institute of renewable energy NAS of Ukraine,
Metrologichna str., 50, Kyiv, Ukraine,
tel: 38(050)972999, e-mail: dima7007bond@gmail.com

Based on the needs of 'green' hydrogen production from renewable energy sources, this paper proposes the use of a hybrid photovoltaic thermal collector connected to an electrolyzer. Utilizing the most promising electrolyzer, with a proton exchange membrane, the necessity of using heated water as a feedstock was established. For this purpose, along with a photovoltaic source of electrical energy, it is convenient to use the thermal part of the hybrid collector. The presented system requires calculations and modeling, for which it is convenient to use electrical models. This paper proposes an electrical model of a hybrid photovoltaic thermal collector connected to an electrolyzer.

Key words: *solar energy, hydrogen, hybrid photovoltaic thermal collector, electrolyzer, modeling, electrical model.*

1. ORCID: 0000-0002-5629-930X

2. ORCID: 0009-0003-4651-5253

Вступ

Відновлювані джерела живлення в цей час дедалі більше поширюються і мають різноманітне застосування. Зокрема, можна використовувати джерела сонячної електричної й теплової енергії в системах з різноманітними хімічними процесами. Так, теплова енергія від геліоколекторів може бути використана для підігріву реагентів чи для каталізації хімічного процесу, а електрична енергія від фотоелектричних панелей − для електрохімічних процесів. Цікавим з науково-дослідного та практичного боку є електрохімічний процес дисоціації молекул води на атоми водню і кисню електролізним шляхом.

Перспективним напрямом є застосування фотоелектричних перетворювачів сонячної енергії для живлення електролізера, який є основним елементом процесу отримання водню. У такий спосіб ми отримуємо так званий зелений водень − водень від екологічно чистих відновлюваних джерел енергії з використанням відновлюваної сировини [1, 2].

Встановлено також, що оскільки процес дисоціації потребує певної енергії, то ефективнішим електролітичний розклад водню буде при підвищеній температурі сировини. Тому в межах використання сонячних джерел доцільно застосовувати геліоколектор для підігріву води перед її подачею в електролізер. До того ж для деяких типів електролізерів вода з підвищеною температурою є необхідністю. Наприклад, для перспективного електролізера з протонообмінною мембраною потрібна робоча температура 50–80 °C [3], а отже, – і попередній нагрів води [4].

Тож для здійснення «зеленого» енергетичного забезпечення процесу електролізу може знадобитися пристрій, що об'єднує фотоелектричні й теплові джерела енергії, яким є гібридний фотоелектричний тепловий колектор [5].

Система

Заначимо, що найдоцільніше підключати до відновлюваних джерел енергії вищезгаданий електролізер з протонообмінною мембраною. Це передова технологія, яка вважається життєздатною альтернативою для виробництва водню на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [6, 7].

Тобто, конструюючи пристрій з виробництва водню, ми можемо використати сонячну енергію, застосувавши гібридний колектор, де підігріта в геліоколекторі вода подається як сировина до електролізера, а живлення процесу електролізу здійснює фотоелектрична панель, або ж їх об'єднання. Об'єднання гібридних колекторів може здійснюватися для збільшення вихідних напруг та струмів до необхідних для електролізера значень, а також температур і кількості води – до необхідних електролізеру величин [8].

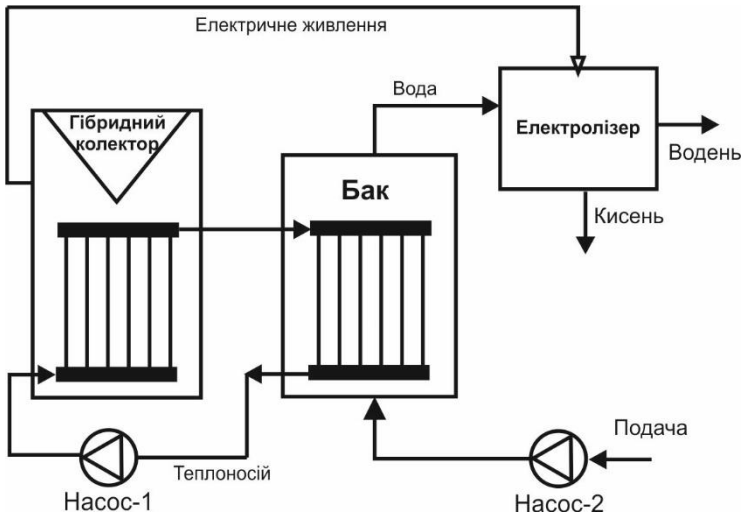


Рис. 1. Гібридний фотоелектричний тепловий колектор, до якого підключено електролізер водню

Система, представлена на рис. 1, складається з гібридного фотоелектричного теплового колектора, бака-накопичувача, двох насосів та електролізера. Насос 1 прокачує теплоносій через теплову частину гібридного колектора і теплообмінник у баку, а насос 2 прокачує підготовлену для електролізера воду через бак та теплообмінник, збільшуючи температуру. Далі вода подається в електролізер, який живиться від фотоелектричної частини гібридного колектора.

Моделювання

Моделювання електролізера має важливе значення для вивчення його взаємодії з ВДЕ та силовою електронікою. Тому, проводячи розрахунки, доцільно застосовувати методи моделювання, які дозволять провести розрахунки системи в цілому. У роботі пропонується застосувати методи аналогій та моделювання за допомогою електричних моделей. Такі методи дозволяють швидко й ефективно проводити моделювання систем, які мають частини різної функціональної природи.

У загальному випадку електрична модель електролізера являє собою послідовне з'єднання омічного опору та зворотно включеного джерела напруги [9], але в разі використання електролізера з протонообмінною мембраною електрична модель буде складнішою (рис. 2) [10, 11].

Електрична модель, представлена на рис. 2, складається з двох RC-комірок (Ra, Ca) і (Rc, Cc), які моделюють електрохімічні процеси на аноді й катоді відповідно, джерело напруги Erev моделює потужність, перетворену на водень і включено назустріч, та резистора Rm, який представляє омічні втрати. Втрати потужності відбуваються в аноді, в катоді, коли заряди проходять через мембрану, в кінцевих пластинах, контактах та резисторах з'єднання. Втрати в

мембрані моделює резистор Rm. Також резистор Ra моделює енергію Гіббса і втрати на аноді, тоді як резистор Rc моделює втрати на катоді.

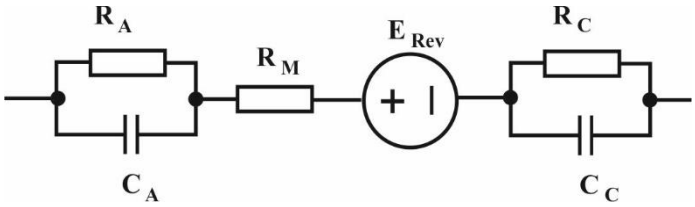


Рис. 2. Електрична модель електролізера водню з протонообмінною мембраною

Для підключення електролізера до гібридного колектора необхідно також застосувати електричну модель такого колектора [12]. І тоді електрична модель гібридного фотоелектричного теплового колектора, до якого підключено електролізер водню, матиме такий вигляд, як показано на рис. 3.

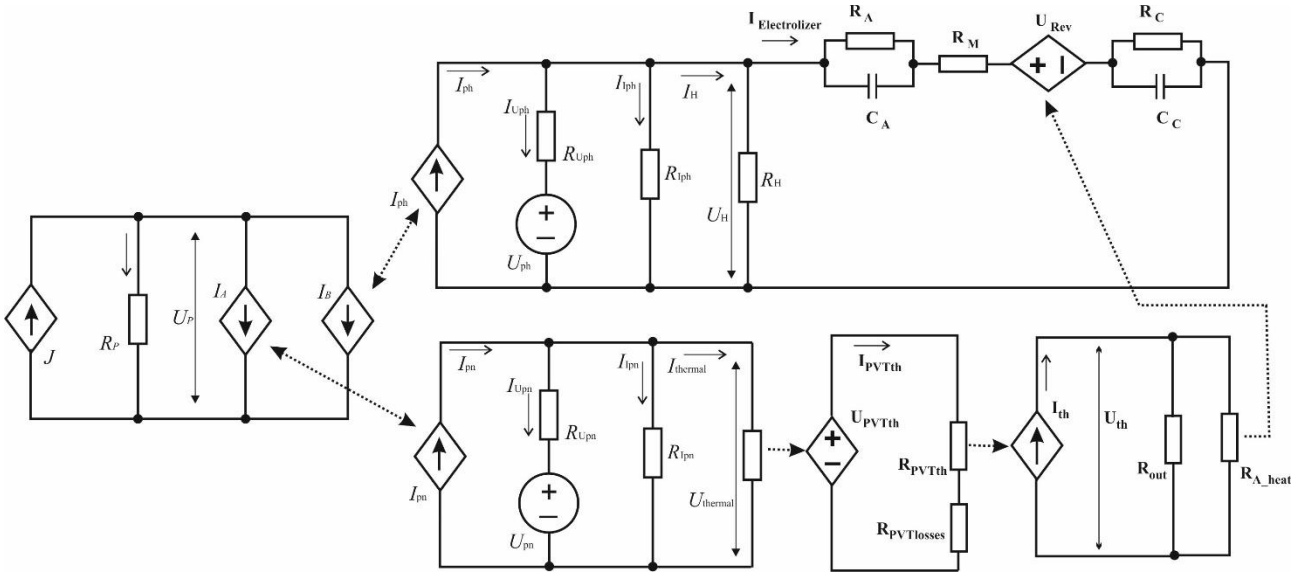


Рис. 3. Електрична *модель гібридного фотоелектричного теплового колектора, до якого підключено електролізер водню*

На рис. 3 видно, що, використовуючи керовані джерела електричної енергії та керовані опори, можна промоделювати всі необхідні процеси і параметри гібридного колектора та навантаження [12]. Також треба зазначити, що в загальному випадку опори і ємності аноду і катоду в електролізері є нелінійними і залежать від температури [13], а джерело напруги Urev керується напругою Uth, яка моделює температуру води на виході з бака-накопичувача (див. рис. 1). Резистор Rн спрощено моделює споживання електричної енергії насосами, які прокачують теплоносій колектора та воду через бак.

На останок зазначимо, що використання запропонованої електричної моделі дозволяє проводити моделювання різних режимів роботи електролізера та джерела енергії, наприклад в імпульсному режимі [14], та проводити імітацію застосування в різних умовах, наприклад в разі затінення сонячних панелей [15].

Висновки та результати

Розробляючи системи для виробництва водню, доцільно використовувати відновлювані джерела енергії, а саме джерела електричної й теплової енергії від сонячного випромінювання. Встановлено, що електролітичний розклад водню буде ефективнішим при підвищеній температурі сировини, води. Тому слід використовувати геліоколектор для підігріву води перед подачею в електролізер. Найбільш підходящим з огляду на режими роботи сонячних джерел енергії є електролізер з протонообмінною мембраною, для якого необхідний підігрів води. Конструювання таких систем виробництва водню потребує розрахунків і моделювання, для чого доцільно використати методи моделювання за допомогою електричних моделей. Тому була побудована електрична модель гібридного фотоелектричного теплового колектора, до якого підключено електролізер.

ПОСИЛАННЯ

1. Kalamaras, Christos M., Efstathiou, Angelos M., Hydrogen Production Technologies: Current State and Future Developments, Conference Papers in Science, 2013, 690627. https://doi.org/10.1155/2013/690627
2. Taibi, E., Miranda, R., Vanhoudt, W., Winkel, T., Lanoix, J. C., & Barth, F. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. 2018.
3. Proton exchange membrane electrolysis [Електронний ресурс] URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Proton_exchange_membrane_electrolysis (дата: 26.03.2025).
4. Peng, Xiaodong & Deng, Zhanfeng & Zhao, Xueying & Li, Gendi & Song, Jie & Liang, Danxi & Sun, Xiaotong & Xu, Guizhi & Kang, Wei & Liu, Min. Experimental and Analytical Study of a Proton Exchange Membrane Electrolyser Integrated with Thermal Energy Storage for Performance Enhancement. International Journal of Photoenergy. 2022. https://doi.org/10.1155/2022/7543121.
5. Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk, T., Sheiko, I. Photovoltaic Thermal Solar Collector for Autonomous and Energy Cluster Modes. Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control. 2024. V. 552. Springer, Cham. Pp. 373–384. https://doi.org/10.1007/978-3-031-67091-6_16
6. Mohamed Khalid Ratib, Kashem M. Muttaqi, Md Rabiul Islam, Danny Sutanto, Ashish P. Agalgaonkar,
1. Electrical circuit modeling of proton exchange membrane electrolyzer: The state-of-the-art, current challenges, and recommendations. International Journal of Hydrogen Energy. 2024. V. 49 Part C. Pp. 625−645. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.08.319.
7. Ángel Hernández-Gómez, Victor Ramirez, Damien Guilbert, Investigation of PEM electrolyzer modeling: Electrical domain, efficiency, and specific energy consumption. International Journal of Hydrogen Energy. 2020. V. 45. Issue 29.
2. Pp. 14625−14639. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.03.195.
8. Bondarenko, D. Combination of pvt-colectors with using of controlled connections. Vidnovluvana Energetika. 2024. № 2(77). Pp. 86–91. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).86-91
9. Marefatjouikilevaee H, Auger F, Olivier J-C. Static and Dynamic Electrical Models of Proton Exchange Membrane Electrolysers: A Comprehensive Review. Energies. 2023; 16(18):6503. https://doi.org/10.3390/en16186503
10. Guilbert D, Vitale G. Dynamic Emulation of a PEM Electrolyzer by Time Constant Based Exponential Model. Energies. 2019; 12(4):750. https://doi.org/10.3390/en12040750
11. Yodwong, Burin & Guilbert, Damien & Hinaje, M. & PHATTANASAK, Matheepot & Kaewmanee, Wattana & Vitale, G. Proton Exchange Membrane Electrolyzer Emulator for Power Electronics Testing Applications. Processes. 2021, #9, p. 498. https://doi.org/10.3390/pr9030498.
12. Bondarenko, D. Electrical model of the hybrid photovoltaic thermal colector. Vidnovluvana Energetika. 2025. № 1(80). Pp. 44–50. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).44-50
13. Chen, Mengxing & Chou, Shih-Feng & Blaabjerg, F. & Davari, Pooya. Overview of Power Electronic Converter Topologies Enabling Large-Scale Hydrogen Production via Water Electrolysis. Applied Sciences. 2022. #12. P. 1906. https://doi.org/10.3390/app12041906.
14. Simon Puteanus, Tamara Miličić, Ute Feldmann, Tanja Vidaković-Koch. Efficiency improvement by pulsed water electrolysis: An unjustified hope. International Journal of Hydrogen Energy. 2025. V. 113. Pp.478−484. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.02.348.
15. Kangle Cheng, Shan He, Bing Hu, Modelling and optimisation of PV-PEMEC hydrogen generation system considering partial shading conditions. International Journal of Electrochemical Science. 2024. V. Issue 6. https://doi.org/10.1016/j.ijoes.2024.100577.

УДК 621.311

ОХОЛОДЖЕННЯ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ЯК МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЇХ ПРОДУКТИВНОСТІ

М. М. Юрченко[1], С. В. Матях[2]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: +38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net

Розглянуто фактори, що впливають на ефективність роботи фотоелектричних елементів та їх охолодження як метод підвищення продуктивності.

Ключові слова: *відновлювана енергетика, сонячна енергія, фотоелектричні елементи, сонячні панелі, ефективність роботи сонячних панелей, деградація фотоелектричних елементів та сонячних панелей, охолодження фотоелектричних елементів та сонячних панелей.*

IMPROVING THE EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC MODULES BY AIR COOLING

M. Iurchenko[1], S. Matyakh[2]

Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine,
50 Metrolohichna street, Kyiv, Ukraine, 03143
Tel/fax: +38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net

Factors affecting the efficiency of photovoltaic cells and their cooling as a method of increasing performance are considered.

Key words: *renewable energy, solar energy, photovoltaic cells, solar panels, efficiency of solar panels, degradation of photovoltaic cells and solar panels, cooling of photovoltaic cells and solar panels.*

ORCID: [1]0009-0000-7307-6039; [2]0000-0002-1707-3519

Один з найпоширеніших видів відновлюваної енергії – сонячна енергія. Її переваги використання: вона легкодоступна в багатьох місцях, має низькі експлуатаційні витрати та може бути використана у невеликих децентралізованих системах енергопостачання. Сонячної радіації, що досягає Землі, теоретично достатньо, щоб задовольнити в 10 000 разів поточні енергетичні потреби світу [1].

Перетворення сонячної енергії на електричну здійснюється за допомогою фотоелектричних (PV) сонячних елементів. Однак сонячне випромінювання, яке поглинається, але не перетворюється на електрику, викликає підвищення температури сонячних елементів, знижуючи ефективність їх роботи [2].

Під час роботи, особливо в спекотну погоду, сонячні панелі нагріваються. Підвищення температури поверхні сонячного модуля негативно впливає на його техніко-експлуатаційні характеристики. Ця залежність описується температурними коефіцієнтами напруги та струму. Оптимальною температурою експлуатації фотоелементів вважається 25 °C. При температурі вище оптимальної напруга холостого ходу та коефіцієнт заповнення ВАХ зменшується, а струм короткого замикання незначно підвищується. Також якщо рівень сонячної радіації нижче 200 Вт/м^2, ККД сонячної панелі починає різко знижуватись [3].

Одним із факторів, що впливає на зниження ефективності роботи фотоелементів та сонячних панелей є їх деградація, тобто погіршення характеристик сонячних модулів з плином часу, поступове зниження якості, руйнування внаслідок зовнішнього впливу. З часом вироблення електроенергії повільно зменшується.

Під час експлуатації монокристалічні та полікристалічні фотоелектричні елементи втрачають ефективність у середньому зі швидкістю 1 % щороку. Виробники зазвичай гарантують близько 90 % продуктивності до перших десяти років і 80 % – до 25–30 років роботи. Однак останні дослідження показують, що монокристалічні панелі, виготовлені після 2000 року, можуть деградувати зі швидкістю всього 0,4 %. Виробники заявляють термін служби сонячних панелей 20–25 років.

Одна з причин деградації сонячних панелей – агресивна дія навколишнього середовища, а саме:

– перегрів сонячних панелей;

- постійний вплив зміни температур, що призводить до утворення мікротріщин, а отже, викликає погіршення електричних з'єднань;
- сильні пориви вітру викликають підвищення динамічних і механічних навантажень;
- вологість, сніг і лід повільно сприяють старінню батареї [3].

Отже, підвищення температури панелей під час роботи знижує їх ККД, а також прискорює їх деградацію.

Щоб протидіяти цьому явищу, комірки можуть охолоджуватися робочою рідиною (теплоносієм), щоб підтримувати високий рівень ефективності перетворення енергії сонячного випромінювання на електричну енергію. Найрозповсюдженіший теплоносій – це вода або повітря, що відбирає тепло з фотоелектричних елементів для використання в інших процесах. У результаті створюється гібридне сонячне обладнання з одночасним виробництвом електричної й теплової енергії, яке називається фотоелектричним-тепловим колектором або просто PVT. Зазвичай гібридний сонячний колектор PVT – це пристрій, що утворений фотоелектричним модулем із прикріпленим теплообмінником на його задній панелі. Він вважається когенераційним обладнанням. Перевага цього обладнання полягає в тому, що воно може одночасно генерувати як електричну, так і теплову енергію з хорошим рівнем ефективності та на меншій площі, ніж теплові колектори та фотоелектричні панелі, що працюють окремо [2].

Таким чином, PVT є конфігурацією сонячної системи, яка була створена на основі поєднання фотоелектричного модуля з тепловим колектором. PVT-колектор перетворює більше сонячної енергії на площу, ніж відповідна взаємодія окремого фотоелектричного модуля та сонячного теплового колектора. Тож це сприяє зниженню витрат на виготовлення та монтаж.

В останнє десятиліття були зроблені серйозні кроки в напрямі впровадження PVT-модулів для задоволення внутрішніх потреб, особливо в місцях з обмеженим простором для установки фотоелектричних модулів і теплового колектора. Однією з переваг цієї технології порівняно зі звичайними тепловими колекторами є естетична перевага. Іншою привабливою особливістю є ринкова ніша, яка може бути сформована як з комунальних, так і з автономних систем. Однак промисловість поки що мало залучена до масового виробництва PVT, і загальні знання потребують поглиблення завдяки останнім розробкам [4].

Проте крім переваг PVT сонячні колектори мають деякі недоліки. Теплова енергія, яку виробляє такий комбінований колектор є низькопотенційною. А саме низька температура отриманого теплоносія може обмежено використовуватись у теплоенергетичних процесах для задоволення потреб промисловості або домогосподарств. Це звужує можливості її використання. А вплив сезонності на потенціал та наявність цієї теплової енергії також зменшує період можливого використання такого пристрою. У разі спроби отримати теплоносій з вищою температурою значно зменшується ефективність виробництва електроенергії фотоелектричним модулем.

Однак зниження температури за рахунок охолодження сонячних панелей без використання теплової енергії сприятиме підвищенню ефективності їх роботи, а також зниженню швидкості деградації фотоелементів.

Здебільшого охолодження сонячних панелей відбувається за допомогою води або повітря. Повітряне охолодження – найпростіший та економічно вигідний метод, що використовує природний або примусовий потік повітря для відведення тепла. Системи активного повітряного охолодження сонячних панелей на сьогодні потребують подальшого вивчення та вдосконалення для застосування їх під час будівництва сонячних електростанцій з метою підвищення ефективності та продуктивності їх роботи.

ПОСИЛАННЯ

1. Madalina Barbu, George Darie, Monica Siroux. Analysis of a Residential Photovoltaic-Thermal (PVT) System in Two Similar Climate Conditions. Energies, 2019, 12 (19).
2. C. A. F. Ramos, A. N. Alcaso, A. J. M. Cardoso. Photovoltaic-thermal (PVT) technology: Review and case study. International Conference on New Energy and Future Energy System IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 354, 2019.
3. В. И. Шкляр, В. В. Дубровская, Д. С. Карпенко. Использование энергии Солнца фотоэлектрическими системами. Відновлювана енергетика. 2014. № 3.
4. Mahdi Shakouri, Hossein Ebadi, Shiva Gorjian. Chapter 4. Solar photovoltaic thermal (PVT) module technologies. Photovoltaic Solar Energy Conversion. Technologies, Applications and Environmental Impacts, 2020, p. 79–116.

УДК 621.311

АНАЛІЗ ДІАГНОСТИЧНИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

М. О. Карпаш[1, 1], Л. Я. Жовтуля[2, 1], В. Б. Васечко[3, 1], М. О. Шевчук[4, 1], А. В. Яворський[5, 2]

[1]Університет Короля Данила,
[1]вул. Євгена Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна
[2]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
[2]вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна,
тел.: (095) 028-76-22, e-mail: valentyn.vasechko@ukd.edu.ua

Під час виконання поставлених в роботі завдань були використані загальні методи теоретичного аналізу проблеми, засновані на вивченні методів визначення деградації фотоелектричних модулів, включаючно з електрохімічною імпедансною спектроскопією, а також оцінка проблем управління відходами в секторі сонячної енергетики України.

Ключові слова: *фотоелектричні модулі, агностика деградації, електрохімічна імпедансна спектроскопія, управління закінченням терміну експлуатації, енергетична безпека України, циркулярна економіка.*

ANALYSIS OF DIAGNOSTIC METHODS FOR DETERMINING THE DEGRADATION OF PHOTOVOLTAIC MODULES

M. Karpash[1, 1], L. Zhovtulya[2, 1], V. Vasechko[3, 1], M. Shevchuk[4, 1], A. Yavorskyi[5, 2]

[1] King Danylo University,
[1]35, Yevhen Konovalets str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018
[2]Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
[2]15, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019,
phone: (095) 028-76-22, e-mail: valentyn.vasechko@ukd.edu.ua

In solving the tasks set in this work, general methods of theoretical analysis of the problem were used, based on the study of methods for determining the degradation of photovoltaic modules, including electrochemical impedance spectroscopy, as well as an assessment of waste management problems in the solar energy sector of Ukraine.

Key words: *photovoltaic modules, degradation diagnostics, electrochemical impedance spectroscopy, end-of-life management, energy security of Ukraine, circular economy.*

ORCID: [1]0000-0002-4223-3828; [2]0000-0001-5255-8522; [3]0009-0007-0414-7308; [4]0000-0003-0362-6378; [5]0000-0002-5970-4286

Ukraine has seen significant growth in its solar energy sector over the past decade, establishing it as the eighth largest in Europe for installed photovoltaic (PV) capacity [1,2]. Solar energy contributes more than 5% to the nation's total electricity production, underscoring its growing role in Ukraine's energy mix. However, the ongoing war has dramatically transformed the role of solar energy from primarily supporting "green transition" goals to becoming an essential component of national energy security and grid resilience in the face of widespread destruction of traditional power generation infrastructure.

The growth of solar energy is also accompanied by challenges, particularly concerning the management of end-of-life PV modules. A majority of Ukraine’s solar installations occurred after 2018, and with an average lifespan of 25-30 years for PV panels, the country is poised to face significant waste management issues by 2035-2048. Currently, Ukraine lacks dedicated recycling facilities for PV modules, appropriate disposal regulations, and sustainable disposal practices, with only aluminum frames typically being recycled while other components are discarded.

These challenges call for urgent research on PV panel degradation to understand its patterns and develop effective recycling technologies. This research addresses the immediate needs of maintaining the operational efficiency of solar assets in a time of war, and will contribute to long-term sustainability by developing circular economy models for solar components in Ukraine. Factors as war-related damage, the strategic importance of solar energy for national resilience, and future waste management considerations - highlight the urgent need for advanced diagnostic approaches to extend the life of PV assets and optimize their performance in the Ukrainian context.

The degradation of photovoltaic modules is a complex process influenced by numerous environmental factors. The most common factors contributing to PV module degradation are temperature, humidity, irradiation, dust, and mechanical stress [3]. This degradation manifests in various physical and electrical forms impacting module performance. It may include interconnect breakage, cell cracks, shunts, corrosion, discoloration, delamination, encapsulation cracking, bubbles, and hot spots. These physical changes significantly affect critical electrical parameters including short-circuit current (Isc), series resistance (Rs), fill factor (FF), open-circuit voltage (Voc), and shunt resistance (Rsh). The cumulative effect is a gradual decrease in module efficiency and power output over time, ultimately shortening the effective lifespan of photovoltaic systems under real-world operating conditions.

As a result of the ongoing conflict in Ukraine, a significant number of PV modules have been severely damaged, especially in the southern regions, where about 40% of solar power plants have been affected. While many panels have obvious physical damage that renders them clearly inoperable, a more complex problem arises with panels which may have internal micro-damage. Such modules pose a critical problem for assessing energy infrastructure rehabilitation efforts, as energy conversion efficiency can be significantly reduced without visible external signs. This phenomenon requires comprehensive diagnostic methods to accurately assess functionality and determine whether these panels have persistent internal damage from shock waves, vibrations, or other war-related stressors that reduce efficiency. Accurately identifying these damaged but visually intact modules is essential for the immediate restoration of power supply, and for the development of effective categorization methodologies within the future PV recycling system in Ukraine.

Several established methods have been developed to detect and study solar cell degradation. These include the I-V measurement method, which analyzes the current-voltage characteristics of solar cells [4], the EL electro luminescence method, which detects defects and cracks in solar cells as images [5], and thermography-based detection method, which detects cell defects based on temperature differences [6]. Additionally, electrochemical impedance spectroscopy (EIS) demonstrates significant promise as a non-destructive diagnostic method for evaluating solar panel degradation. As evidenced by recent research [7], EIS applies a small AC voltage to the solar cell and measures the current response, calculating impedance from the amplitude ratio and phase difference between applied voltage and resulting current. By sweeping frequencies and analyzing Nyquist and Bode diagrams, researchers have successfully identified mechanical degradation in solar cells by comparing the element values of equivalent circuits between normal and degraded states.

The application of EIS in solar cell maintenance is particularly relevant in the Ukrainian context, where the renewable energy sector is scaling up rapidly as part of energy security initiatives and integration with European energy markets. Ukraine's geographical position provides substantial solar potential, yet the sector faces challenges with factors that accelerate panel degradation. Non-destructive testing methods like EIS would enable Ukrainian solar farm operators to implement predictive maintenance strategies, optimizing the operational lifespan of photovoltaic installations. It could help to reduce significantly maintenance costs and improve the reliability of solar installations, contributing to Ukraine's environmental goals. The relatively low implementation cost of EIS compared to other diagnostic methods makes it particularly suitable for widespread adoption in Ukraine's renewable energy infrastructure.

ПОСИЛАННЯ

1. Global Photovoltaic Power Potential by Country. World Bank, Washington (2020). https://doi.org/10.1596/34102
2. IRENA, Renewable energy statistics 2023, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi (2023).
3. Understanding Photovoltaic Module Degradation: An Overview of Critical Factors, Models, and Reliability Enhancement Methods / S. Diallo et al. E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 469. P. 00011. URL: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202346900011 (date of access: 28.02.2025).
4. van Dyk E. E., Gxasheka A. R., Meyer E. L. Monitoring current-voltage characteristics of photovoltaic modules. Conference Record of the Twenty-Ninth IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2002, New Orleans, LA, USA. URL: https://doi.org/10.1109/pvsc.2002.1190899 (date of access: 28.02.2025).
5. Detection of the voltage distribution in photovoltaic modules by electroluminescence imaging / T. Potthoff et al. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2010. Vol. 18, no. 2. P. 100–106. URL: https://doi.org/10.1002/pip.941 (date of access: 28.02.2025).
6. Salazar A. M., Macabebe E. Q. B. Hotspots Detection in Photovoltaic Modules Using Infrared Thermography. MATEC Web of Conferences. 2016. Vol. 70. P. 10015. URL: https://doi.org/10.1051/matecconf/20167010015 (date of access: 28.02.2025).
7. Agata K., Kakoi Y., Katayama N., Kamei H., Konuma T., Nakamura R., Baba Y. (2022). Equivalent Circuit Model for Impedance Analysis of Solar Cells Degraded Due to Mechanical Stress. In Grand Renewable Energy proceedings GRE2022 (p. 10). Japan Council for Renewable Energy. URL: https://www.jstage.jst.go.jp/article/gre/2/0/2_10/_article/-char/ja/ (date of access: 28.02.2025).

УДК 621.311.25

ФОТОЕЛЕКТРОХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПЛІВОК ZNO, МОДИФІКОВАНИХ БАРВНИКАМИ

В. О. Смілик[1], С. С. Фоманюк, Г. Я. Колбасов, І. А. Русецький, М. О. Данілов

Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України,
просп. Академіка Палладіна, 32/34, Київ, 03142, Україна,
тел.: (063) 830-40-13, e-mail: VitaliySmilyk@i.ua

Електроди на основі ZnO і TiO_2 були сенсибілізовані до видимого світла катіонним поліметиновим барвником. Аналіз фотоелектрохімічних характеристик отриманих електродів показав, що сенсибілізовані барвником плівки ZnO в діапазоні довжин хвиль 420–620 нм мають вдвічі більший квантовий вихід фотоструму в порівнянні з TiO_2. Таким чином формується гібридна структура барвник-ZnO, чутлива до видимого світла, яку можна використовувати для фотоелектрохімічних елементів для перетворення сонячної енергії.

Ключові слова: *фотоелектрохімія, сенсибілізація, оксид цинку, поліметиновий барвник.*

PHOTOELECTROCHEMICAL PROPERTIES OF ZNO FILMS MODIFIED WITH DYES

V. Smilyk[1], S. Fomanyuk, G. Kolbasov, I. Rusetskyi, M. Danilov

V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry, NAS of Ukraine,
Academician Palladin Avenue, Kyiv, Ukraine, 03142
phone: (063) 830-40-13, e-mail: VitaliySmilyk@i.ua

Electrodes based on ZnO and TiO_2 were sensitized to visible light with a cationic polymethine dye. The analysis of the photoelectrochemical characteristics of the obtained electrodes showed that the dye-sensitized ZnO films in the wavelength range of 420-620 nm have a photocurrent quantum yield twofold higher compared with TiO_2. In this way, a hybrid dye-ZnO structure sensitive to visible light is formed, which can be used for the photoelectrochemical cells for solar energy conversion.

Keywords: *Photoelectrochemistry, sensitization, zinc oxide, polymethine dye.*

ORCID: [1] 0000-0002-3918-3575.

Сенсибілізовані барвниками оксиди металів широко вивчаються як альтернатива кремнієвим сонячним елементам. Пориста плівка оксиду металу, сенсибілізованого барвником разом з електролітом і проти-електродом, утворює готовий сонячний елемент. Найпоширенішим напівпровідниковим матеріалом для цих застосувань є TiO_2, але інші також становлять інтерес, зокрема на основі ZnO. В ZnO схоже до TiO_2 енергетичне положення зони провідності й величина забороненої зони. Однак ZnO на відміну від TiO_2 володіє вищою рухливістю електронів і більшою кількістю структурних модифікацій [1]. Ці властивості порівняно з TiO_2 дають йому більше можливостей для реалізації зарядових станів. Ширина забороненої зони ZnO 3,3 еВ [2], що робить його перспективним напівпровідником для фотогенерації електрон-діркових пар. Проте він поглинає лише ультрафіолетове світло, тому необхідна його сенсибілізація барвниками, що дозволить розширити спектр поглинання у видимому діапазоні. Вибір барвника (органічного, координаційного комплексу металів або квантових точок) впливає на ефективність фотоелектричних процесів. Дослідження таких систем дає змогу знайти оптимальні комбінації матеріалів для покращення продуктивності фотоелектрохімічних пристроїв.

Дослідження квантового виходу фотоструму, залежності фотоструму від фотоелектричної напруги та ІЧ-спектроскопія виявили, що ефективність сенсибілізації ZnO катіонним поліметиновим барвником № 5230 була вищою, ніж у разі його використання на TiO_2. Інфрачервоною спектроскопією було встановлено, що позитивний ефект такої сенсибілізації – в ефективному зв'язуванні барвника з ZnO, тобто в характері хімічного зв'язку ZnO з барвником, спричиненого хімічною структурою барвника та амфотерною природою ZnO порівняно з TiO_2 [3]. Щоб пояснити різницю між характеристиками сенсибілізованого до барвника ZnO та TiO_2, ми обмежилися даними літератури [3], з яких відомо, що для формування фоточутливого у видимому світлі TiO_2 перед сенсибілізацією барвником необхідна додаткова обробка поверхні TiO_2 сильними кислотами або використання барвника, що містить декілька кислотно-основних центрів COO- [3]. Це сприяє травленню поверхні TiO_2 та утворенню активних кислотно-основних

центрів, які можуть брати участь у зв'язуванні з молекулами барвника та ефективному переносі електронів у таких гібридних системах [3]. Отже, можна зробити висновок, що на відміну від TiO_2, який сенсибілізується в основному барвниками на основі рутенію паладію платини, для сенсибілізації ZnO можна використовувати барвники з меншою активністю кислотно-основних центрів, що спрощує умови синтезу та підготовки поверхні таких гібридних систем.

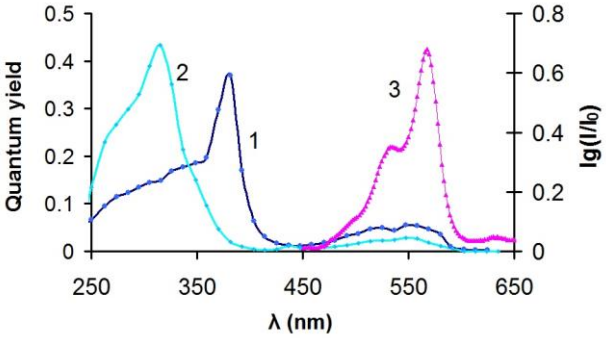


Рис. 1. Спектри квантового виходу фотоструму для плівок ZnO на скляній підкладці зі струмопровідним шаром на основі SnO_2 (1) та TiO_2 на титановій підкладці (2). Оптичний спектр поглинання розчину 0,03 г/л барвника в бензолі (3)

Порівняльний аналіз квантового виходу фотоструму (рис. 1) для зразків ZnO (1) та TiO_2 (2), сенсибілізованих до видимого світла катіонним поліметиновим барвником № 5230 (спектр поглинання якого на рис. 1 (3)), показав у рази більшу ефективність використання ZnO у порівнянні з TiO_2. У практичному використанні зразки сенсибілізованого ZnO мають в 1,5 раза вищі показники фотоструму порівняно з чистим ZnO.

ПОСИЛАННЯ

1. R. Scholin, M. Quintana, E. M. J. Johansson, M. Hahlin, T. Marinado, A. Hagfeldt, H. Rensmo Preventing Dye Aggregation on ZnO by Adding Water in the Dye-Sensitization Process |J. Phys. Chem. C 2011, 115, 19274–19279.
2. F. F. Oliveira, M. P. Proenca, J. P. Araújo, and J. Ventura, *J. Mater. Sci.* **51,** 5589 (2016).
3. Fomanyuk, S. S.; Ishchenko, A. A.; Kudinova, M.; Rusetskyi, I. A.; Danilov, M. O.; Gubareni, E.; Dovbeshko, G. I.; Smilyk, V. O.; Kolbasov, G. Y. ZnO Sensitization by Polymethine Dye in Photoelectrochemical Cells for Solar Energy Conversion. *Fiz. Nizk. Temp.* 2024, 50, 300–305.

PROSPECTS OF SOLAR ENERGY UTILIZATION IN UZBEKISTAN AND CENTRAL ASIA: A PHYSICIST'S PERSPECTIVE

K. Ismaylov[1] , Sh. Ollamberganov[1] , T. Ismailov[2], D. Vakhobov[2]

[1]Karakalpak State University named after Berdakh
[2]Tashkent State Technical University named after Islam Karimov
osherzod12121212@gmail.com

***Keywo**rds: polycrystalline silicon, photovoltaic energy, solar radiation in Central Asia, thermal stress, renewable energy in Uzbekistan, defect spectroscopy, arid climate performance*

1. Introduction Uzbekistan and its neighboring Central Asian countries possess significant potential for solar energy generation due to their geographical position and climatic conditions. The region receives an average solar insolation of 5.4 to 6.0 kWh/m²/day and experiences over 300 sunny days per year, making it one of the most solar-rich zones in the world [1]. As global demand for sustainable energy grows and fossil fuel reserves decline, solar photovoltaic (PV) systems offer a viable and eco-friendly solution to meet regional energy needs.

Theoretical Background Photovoltaic energy is generated through the photovoltaic effect, where photons excite electrons across the semiconductor band gap, generating electric current. In crystalline silicon (c-Si) and polycrystalline silicon (poly-Si) solar cells, this effect is influenced by material purity, temperature, and surface conditions.

The efficiency η of a PV system is generally expressed as:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{A \cdot G}$$

Where:
V_{oc} - open-circuit voltage
I_{sc} - short-circuit current
FF- fill factor
A - active area of the solar cell
G - incident solar irradiance

Temperature dependence of the semiconductor band gap, particularly in silicon, can be modeled by the Varshni equation:

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$$

Where $E_g(0)$ is the bandgap at 0 K, α alpha and β beta are material-specific constants, and T is the temperature in Kelvin.

Environmental Challenges Despite high solar insolation, several environmental factors limit PV performance in Uzbekistan:

- **High ambient temperatures** in regions like Karakalpakstan and Bukhara can reduce PV output by decreasing V_{oc}
- **Dust accumulation** from frequent sandstorms and arid winds reduces transmittance, diminishing PV output by up to 30% [2].
- **Thermal cycling** causes microcracks in PV cells, leading to increased recombination and defect density.

Spectroscopic studies such as Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) and Capacitance-Voltage (C-V) profiling reveal increased defect states and trap densities in PV modules under such stress conditions [3].

Technological Solutions Advancements in nanotechnology and material science have provided various mitigation strategies:

- **Anti-reflective and self-cleaning nano-coatings** improve transmittance and reduce dust adhesion.
- **Passivated emitter and rear cell (PERC)** architectures enhance charge carrier lifetimes.
- **Bifacial modules** and **tracking systems** improve overall energy yield by up to 25% [4].
- **PID-resistant encapsulants** reduce degradation due to high voltage and humidity.

Simulation studies conducted using MATLAB/Simulink and COMSOL Multiphysics allow for predictive modeling of PV behavior under real environmental conditions. These simulations are crucial for grid integration and long-term planning.

Future Perspectives If Uzbekistan invests in large-scale solar projects utilizing modern PV technologies, it could generate over 5 GW of solar energy by 2030 [5]. The Heliosat model and solar radiation forecasting tools enable high-accuracy estimations for site selection and plant operation. Moreover, integration with energy storage systems and smart grids would stabilize the supply and increase efficiency.

Physics-based policy recommendations and feasibility studies are essential for optimizing these transitions. Solar energy research institutions in the region are now focusing on improving module durability and developing region-specific solutions.

6. Conclusion Uzbekistan and Central Asia possess the necessary solar resources and technological pathways to become leaders in solar energy adoption. Through scientific research and innovative engineering solutions, the challenges posed by the harsh climate can be overcome, making solar power a cornerstone of sustainable development in the region.

REFERENCES

1. International Renewable Energy Agency (IRENA), "Renewable Energy Prospects: Central Asia," 2019. https://www.irena.org/publications/2019/Jun/Renewables-in-Central-Asia
2. M. Mekhilef et al., "Dust and performance degradation in solar photovoltaic systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 67, pp. 876–891, 2017. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.018
3. S. Kalemci et al., "Impact of thermal cycling on PV module performance," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 120, pp. 536–543, 2014. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.09.033
4. J. Singh and N. Ravindra, "Bifacial solar modules: Performance and applications," Energy Reports, vol. 6, pp. 1–8, 2020. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.09.008
5. Asian Development Bank (ADB), "Uzbekistan Solar Energy Development Report," 2021. https://www.adb.org/projects/documents/uzbekistan-solar-development-report-2021

THE INFLUENCE OF GEOMETRIC FACTORS ON THE CHARACTERISTICS OF SILICON-BASED SOLAR CELLS

Botirjon Urmonov

Andijan state university
129 University St., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99899) 523-63-60, e-mail: komilovmdotcom94@gmail.com

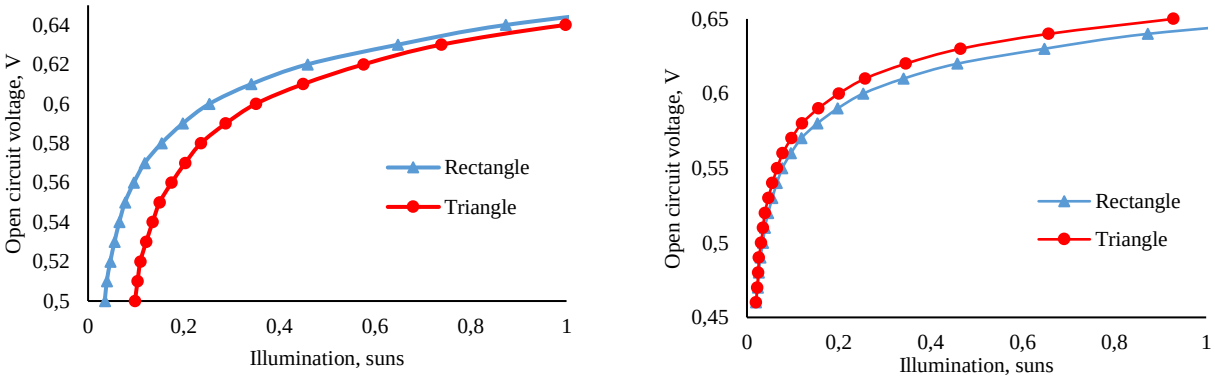
Abstract: The shape and dimensions of silicon-based solar cells are crucial for improving their efficiency. In this study, the relationship between the open-circuit voltage and light intensity was investigated for triangular and rectangular solar cells with an identical surface area of 1,352 mm². According to the results, under 0.1 sun illumination, the voltage generated by the rectangular-shaped solar cell was found to be 0.06 V higher than that of the triangular-shaped sample.

Key words: *silicon, Sinton Suns Voc, rectangle, triangle, monofacial solar cell.*

Semiconductor photovoltaic p-n junctions are primarily used to convert sunlight into electrical energy, as photovoltaic energy is considered more promising compared to other types of renewable energy sources [1]. There are many types of photovoltaic converters, but in industry, silicon-based photovoltaic converters are predominantly produced. It is known that the highest experimentally obtained efficiency of single p-n junction silicon-based solar cells is 26%, while the theoretical efficiency is 29% [2].

In the design of solar cells, there are mainly three types of energy losses: thermal, electrical, and optical (more than 30% of sunlight is reflected from the front surface). To reduce this, various anti-reflective coatings are applied to the surface, and surface texturing is used [3].

It has been observed that when the shape and surface of photovoltaic converters are modified, their photovoltaic parameters vary depending on the type of material used. Therefore, it is important to study photovoltaic converters of various sizes based on monocrystalline and polycrystalline silicon with different shapes. In this article, a study was conducted on triangular and rectangular solar cells based on practical experiments. Figure shows the dependence of the open-circuit voltage on light intensity for solar cells made from polycrystalline (a) and monocrystalline (b) silicon, in both rectangular and triangular shapes, each with a surface area of 1,352 mm². It was found that, at low light intensities, the open-circuit voltage of polycrystalline silicon-based rectangular solar cells is higher compared to that of triangular-shaped samples. This indicates that under 0.1 sun illumination, the voltage generated by the rectangular-shaped solar cell was found to be 0.06 V higher than that of the triangular-shaped sample. As light intensity increases, the difference gradually decreases. In conclusion, low light intensity appears to cause a reduction in the photogeneration rate.



b)

Figure. Dependence of the open-circuit voltage on light intensity for solar cells of rectangular and triangular shapes (1352 mm²) made from polycrystalline (a) and monocrystalline (b) silicon

REFERENCES

1. P. A. Ostergaard, N. Duic, Y. Noorollahi, H. Mikulcic, and S. Kalogirou, “Sustainable development using renewable energy technology,” *Renewable Energy*, vol. 146, pp. 2430–2437, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.RENENE.2019.08.094
2. W. Shockley and H. J. Queisser, “Detailed balance limit of efficiency of p-n junction solar cells,” *J Appl Phys*, vol. 32, no. 3, pp. 510–519, 1961.
3. S. C. Baker-Finch and K. R. McIntosh, “Reflection distributions of textured monocrystalline silicon: implications for silicon solar cells,” *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 21, no. 5, pp. 960–971, Aug. 2013, doi: 10.1002/PIP.2186.

DETERMINING THE I-V CHARACTERISTICS OF SILICON-BASED SOLAR CELLS OVER DIFFERENT TEMPERATURE RANGES USING MODELING

R. Aliev, J. Ziyoitdinov, A. Mirzaalimov, M. Komilov, B. Rashidov.

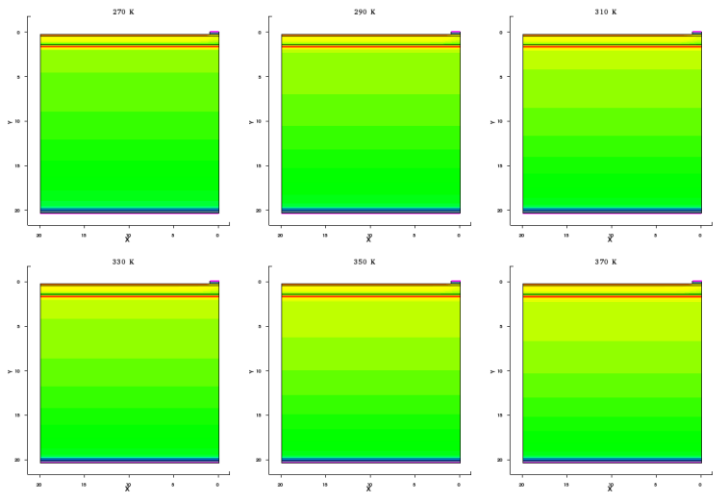
Andijan State University, Andijan State Technical University
129 University str, Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99899) 523-63-60, e-mail: ziyoitdinov@yahoo.com

Abstract. *In this study, effective approaches to the utilization of solar energy have been identified. It was observed that the temperature of the solar cell undergoes significant changes as a result of light exposure on its surface. Consequently, the heating effect exerts a substantial influence on the key electrophysical parameters, particularly leading to an increase in the recombination of charge carriers. Experimental investigations carried out within the temperature range of 270 K to 390 K revealed a significant rise in the proportion of Shockley–Read–Hall (SRH) recombination.*

Key words: *silicon, temperature, solar cell, SRH recombination.*

ORCID: 0009 0007 6958 4074

Due to the fact that solar cells are composed of semiconductor materials, the study of their electrophysical and photoelectric parameters is a crucial task. Silicon-based solar cells are among the most widely produced types in the world [1]. For this reason, a silicon-based solar cell was selected for this research. All solar cells are sensitive to external factors such as temperature, humidity, pressure, and other environmental conditions [2]. Among these, temperature is considered one of the most significant parameters affecting solar cell performance. Therefore, temperature plays an important role in the efficient utilization of solar energy. In a solar cell, light absorption in the p-n junction generates an internal electric field. This electric field drives both majority and minority charge carriers. The motion of these carriers depends on several external conditions. In particular, the temperature of the solar cell can lead to increased recombination of majority charge carriers. Therefore, this study focuses on examining the effects of recombination in a solar cell under different temperature conditions. Initially, the geometric structure of the solar cell was modeled using the Sentaurus TCAD simulation software. Subsequently, the effect of temperature on the solar cell was analyzed in the range of 270 K to 390 K, with an increment of 20 K (Fig 1).



In this study, AM 1.5g light spectrum was applied to a single-sided sensitive solar cell. The results indicate that SRH recombination is significantly high in the region near the p-n junction. This is due to the fact that a large portion of the incident light is absorbed near the surface of the p-n junction, where the charge transport process is most active. During the charge transport process, it was observed that the concentration of the majority charge carriers decreases with increasing temperature, while the concentration of the minority charge carriers increases.

Fig. 1. Visual representation of Shockley-Read Hall recombination at different temperatures in a silicon-based unidirectional solar cell

REFERENCES

1. Gary Cook, Lynn Billman, and Rick Adcock, *Photovoltaic Fundamentals* February, 2023
2. Matteo Cagnoni, Pietro Testa, Jorge S. Dolado, Federica Cappelluti, *Extended detailed balance modeling toward solar cells with cement-based radiative coolers,* 9 November, 2023.

УДК 621.311

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Мілан Бєлік[1], О. О. Рубаненко[1,2,3], О. Є. Рубаненко[3]

[1]Західноческький університет,
Univerzitni 8, 30614 Пльзень (Чеська Республіка)
тел: +00420 377 634315, e-mail: belik4@fel.zcu.cz
[2]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, 02094, м. Київ, Україна
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: rubanenk@fel.zcu.cz
[3] Вінницький національний технічний університет,
Хмельницьке щосе 95, Вінниця, 21021, Ukraine,
тел.: (097) 748-02-85, e-mail: rubanenkoae@ukr.net

В дослідженні розглянуто питання відбиття променів сонячного випромінювання фотоелектричними модулями (ФЕМ). Запропоновано застосовувати маскування для зменшення негативного впливу відбитих променів. Маскування може знижувати обсяг згенерованої електроенергії ФЕМ. Результати експериментальних досліджень, представлені в роботі, допомагають вибрати маску з мінімальним впливом на генерування електроенергії.

Ключові слова: *фотоелектричний модуль, маскування, воль-амперна характеристика, генерування.*

INCREASING THE EFFICIENCY OF USING PHOTOELECTRIC MODULES

Milan Belik[1], O. Rubanenko[1,2,3], O. Rubanenko[3]

[1]University of West Bohemia,
26 Univerzitní str., Plzeň, 30100, Czech Republic
phone: (420) 377-634-315 , e-mail: belik4@fel.zcu.cz
[2]Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine
50 Metrolohichna str., 50, Kyiv, Ukraine, 03143
phone:(044) 206-28-09, e-mail: olenarubanenko@ukr.net
[3]Vinnytsya National Technical University,
95 Khmelnytsky highway, Vinnytsya, 21021, Ukraine,
phone: (097) 748-02-85, e-mail: rubanenkoae@ukr.net

The study considers the issue of reflection of light rays by photovoltaic modules (PVMs). It is proposed to use masking to reduce the negative impact of reflected rays. Masking can reduce the amount of electricity generated by PV modules. The results of experimental studies presented in this paper help to choose a mask with a minimal impact on power generation.

Key words: *photovoltaic module, masking, volt-ampere characteristic, generation.*

ORCID: [1] 0000-0002-9907-5365; [2]0000-0002-2660-182X; [3]0000-0002-9698-4037

Постановка задачі.

Встановлена потужність фотоелектричних систем збільшується з кожним днем, і ця тенденція збережеться протягом кількох десятиліть. Місця для встановлення фотоелектричної системи слід вибирати за кількома критеріями [1, 2]. Фотоелектричні системи встановлюють ближче до споживачів для зменшення втрат електроенергії при передачі генерованої ними електричної енергії та негативного впливу на екологію. Відбиті промені світла ФЕМ заважають водіям потягів і автомобілів, є більш помітними для дронів; привертають увагу птахів. Для забезпечення електроенергією військових укритів використовують фотоелектричні системи. Відбиті промені від скла ФЕМ легко фіксуються і недорогими дронами. У цьому випадку використання масок є доречним рішенням за умови несуттєвого зниження обсягу генерування. Представлене дослідження демонструє результати експериментів з використанням різних типів масок ФЕМ, які можливо створити з доступних матеріалів. Використання будь-якої маски для фотоелектричних модулів може вплинути на виробництво електроенергії. Метою дослідження є визначення оптимального

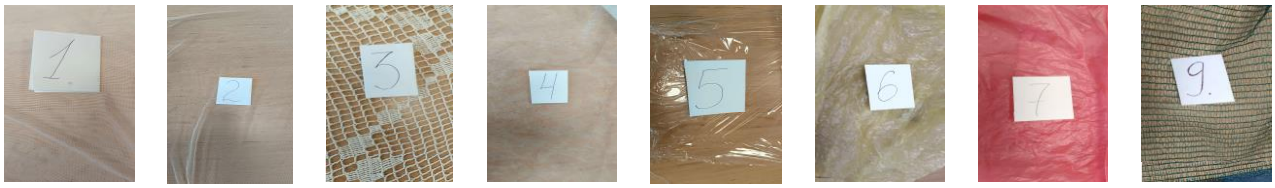
матеріалу для маскування фотоелектричних модулів з мінімізацією зменшення виробленої електроенергії (продуктивності).

(a)

(b)

Рис. 1. Відбиття світла ФЕМ: (a) – наземна ФЕС; (b) – дахова ФЕС

Для оцінювання впливу маски використовували ВАХ ФЕМ при стандартних технічних умовах (STC) з використанням флеш-тестеру PASAN та з різними фільтрами опромінення (1000 Вт/м^2; 900 Вт/м^2; 800 Вт/м^2; 700 Вт/м^2, 600 Вт/м^2) [3]. Маски наведені на рис. 1 і створені з доступних матеріалів (поліетиленова плівка червоного та зеленого кольору), а останнім матеріалом маски є аграрне полотно, яке використне в один, два (номер 9-1) та три шари (номер 9-2) у таблиці 1).



(a) (b) (c) (d) (e) (f) (g) (k)

Рис. 2. Приклади масок

Для експериментів використовувалися два типи вживаних ФЕМ (час експлуатації – більше 10 років) різних розмірів і виробників Solartec STR 36-13 і Solarfam SZ-70-36M. Під час вимірювань необхідно враховувати умови та чутливість флеш-тестеру (чутливість склала 133,51 мВ/(кВт/м^2). Перевірені результати вимірювань зібрані в таблиці 1, при опроміненні 1000 Вт/м^2.

Таблиця 1. Результати вимірювання флеш-тестером ПАСАН

Параметри	Од.в.	Маски										
		(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)red	(g) green	9	9-1	9-2
Temp. =	°C	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Irrad. =	kW/m^2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Voc =	V	0.42	0.57	0.4	0.52	0.623	0.48	0.425	0.516	0.489	0.347	0.241
Eff .=	%	19.51	19.63	19.45	19.61	19.649	19.58	19.528	19.565	19.505	19.314	19.094
FF =	%	8.89	11.24	8.58	10.8	12.13	10.2	9.26	10.59	9.55	6.93	4.98
MPP =	W	82.77	75.16	83.29	80.07	74.85	82.47	84.29	79.32	75.76	78.23	81.8
V@MPP	V	6.72	8.497	6.488	8.16	9.168	7.71	7.003	8.002	7.22	5.238	3.767
I@MPP	A	16.68	15.958	16.94	16.182	15.964	16.75	16.93	16.081	15.846	15.92	16.289
Rser. =	Ohm	0.4	0.532	0.383	0.505	0.574	0.46	0.414	0.498	0.456	0.329	0.231
Rsht =	Ohm	4.1	3.7	4	3.7	3.5	3.7	3.9	3.8	4.1	5	6.2

Висновки. Використання маскування не суттєво зменшело обсяг генерування для малопотужних ФЕМ, але за умови що маска встановлена безпосередньо на панелі. Для перевірки отриманих результатів потрібно регулювати та контролювати температуру ФЕМ та відстань між панеллю та маскою.

ПОСИЛАННЯ

1. S. S. Pal, F. H. C. van Loenhout, J. Westerhof and R. Saive, "Understanding and Benchmarking Ground Reflectors for Bifacial Photovoltaic Yield Enhancement," in IEEE Journal of Photovoltaics, vol. 14, no. 1, pp. 160-169, Jan. 2024, doi: 10.1109/JPHOTOV.2023.3319592. (Article)
2. W. W. Toh, M. H. Saw, E. Birgersson and M. Pravettoni, "A Comparative Study of the Reflectance of Commercial Photovoltaic Modules," 2023 IEEE 50th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), San Juan, PR, USA, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/PVSC48320.2023.10359699.
3. Solar panel testing, combining state-of-the-art optics with cutting-edge measurement technology. Measurement solutions for PV and Space applications.

УДК 621.311

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В МЕЖАХ ЗАГАЛЬНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

С. В. Матях

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: mbenmenni@gmail.com

Розглянуто способи підвищення ефективності роботи сонячних електростанцій в межах загальної енергосистеми за рахунок впровадження систем акумулювання електроенергії та оптимізації піку генерації фотостанцій за рахунок зміни орієнтації відносно сонця.

Ключові слова: *відновлювана енергетика, сонячна електроенергетика, профіцит електрогенерації, акумулювання.*

INCREASING THE EFFICIENCY OF FUNCTIONING OF SOLAR POWER PLANTS WITHIN THE OVERALL ENERGY SYSTEM

S. Matiakh

Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine, Metrolohichna street,
50 Kyiv, Ukraine, 03143
Tel/fax: +38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net

Methods of increasing the efficiency of solar power plants within the general power system due to the introduction of electricity storage systems and optimizing the peak generation of photostations due to changing the orientation relative to the sun are considered

Ключові слова: *renewable energy, solar electricity, electricity generation surplus, electricity storage.*

ORCID: 0000-0002-1707-3519

Сонячна фотоенергетика має великі перспективи для збільшення долі відновлюваних джерел енергії у електрогенерації України. Сонячна електроенергетика вже зараз є суттєвою частиною об'єднаної енергосистеми України, тому досягнення стабільної її роботи забезпечить ефективне функціонування економіки [1]. Ключову роль у підвищенні ефективності, надійності та доступності сонячних електростанцій (СЕС) відіграє впровадження інноваційних технологій, що сприяють зниженню витрат на виробництво і встановлення сонячних панелей, поліпшенню їхніх характеристик і підвищення ефективності їх використання [2].

Одним із проблемних питань при широкомасштабному застосуванні СЕС є добова та сезонна зміна інсоляції. Окрім цього, неспівпадіння добового піку фотоелектричної генерації з періодами пікових навантажень у електричній мережі у випадку масового впровадження сонячних електростанцій призводить до профіциту генерації у денний час. Усі ці фактори вимагають впровадження додаткових технічних підходів для балансування надходження енергії від фотоелектричних джерел. Вирішення цих проблем може відбуватися за рахунок різних підходів. З одного боку, для підняття рівня генерації у пікові періоди доби можна встановлювати фотомодулі по азимутальній орієнтації, яка забезпечить збільшення генерації у визначений піковий період навантаження на електромережу. Але цей підхід не вирішує питання добового балансування і виникає необхідність акумулювання згенерованої електроенергії.

У внутрішньодобовому циклі для короткотривалого акумулювання доцільним є використання разом з генеруючими фотоелектричними потужностями акумулюючих кластерів великої ємності на базі електричних акумуляторів. Такий підхід дозволить забезпечити добову рівномірність надходження енергії до споживача, можливість зменшити необхідну встановлену потужність фотоелектричної генерації.

У річному циклі, з огляду на стрімкий розвиток рішень зеленої водневої енергетики, можливе використання надлишків фотоелектричної генерації у період максимальної інсоляції для отримання зеленого водню. Таким чином падіння сонячної генерації у зимовий період може покриватися використанням накопиченого у сховищах зеленого

водню. Тоді можна буде досягти максимального ефекту від впровадження сонячних електростанцій та забезпечити стабільність та надійність енергопостачання.

ПОСИЛАННЯ

1. Сонячна генерація: змінюються масштаб та географія об’єктів вітроенергетики [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://ua-energy.org/uk/posts/tryfonivska-ses-foto-dtek
2. Перехід на сонячну енергію: як сонячні електростанції знижують енергозалежність у блекаут https://generacia.energy/zelenyj-tarif/perehid-na-sonjachnu-energiju-jak-sonjachni-elektrostancii-znizhujut-energozalezhnist-u-blekaut/

УДК 621.039.533.6, 621.548, 621.311.24

ОПТИМІЗАЦІЯ АВТОНОМНИХ ВІТРОВОДНЕВИХ КОМПЛЕКСІВ

С. О. Кудря[1], М. А. Ткаленко[2], К. В. Петренко[3], Л. В. Яценко[4]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143
тел. +38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net

Розглянуто можливості оптимізації роботи автономних вітроводневих комплексів шляхом створення та застосування багатофакторної інформаційної бази вітрової та водневої енергетики.

Ключові слова: *вітроенергетика, вітроустановка, електроліз, водень.*

OPTIMIZATION OF AUTONOMOUS WIND-HYDROGEN COMPLEXES

S. Kudrya[1], M. Tkalenko[2], K. Petrenko[3], L. Yatsenko[4]

Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine, Metrolohichna street, 50 Kyiv, Ukraine, 03143
Tel/fax:+38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net

One of the ways of solving the problem of decentralization of the energy industry of Ukraine through the use of autonomous wind-hydrogen complexes is considered

Key words: *wind energy, wind turbine, electrolysis hydrogen.*

ORCID: [1]0000-0002-4798-6853, [2]0000-0003-0698-5739, [3]0009-0004-4658-9946, [4]0000-0001-7022-1579

Використання зеленого водню як високоефективного й екологічно прийнятного енергоносія останніми роками розглядається як найперспективніший шлях до вирішення проблем енергосистеми України та суттєвого скорочення шкідливих викидів в атмосферу. Агресивні дії рф проти енергетики України негативно вплинули і на сектор вітроенергетики, але нові виклики дали поштовх до знаходження та прийняття нових інноваційних рішень та інструментів підтримки її подальшого розвитку. Створення та експлуатація автономних вітроводневих комплексів є одним з перспективних шляхів децентралізації вітроелектричної галузі України та декарбонізації вітчизняної економіки. Масштабне використання зеленого водню у комплексі з вітроенергетичним обладнанням сприятиме додатковому скороченню викидів парникових газів і вирішенню проблеми зміни клімату [1, 2]. За інформацією Міжнародного енергетичного агентства, додавання лише 20 % водню в європейську газову мережу скоротить викиди CO_2 на 60 млн т на рік [3].

У відділі вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України виконується науково-дослідна робота «Розробити наукові засади багатофакторного кадастру інформації для оптимізації розміщення в Україні підприємств вітроводневої енергетики», метою якої є визначення оптимальних умов сумісного використання водневих технологій з вітроелектричними станціями та споживачами для декарбонізації електроенергетичної галузі України за рахунок оптимального розміщення підприємств вітроводневої енергетики.

Дослідження щодо формування інформаційної бази багатофакторного кадастру для оптимізації розміщення в Україні підприємств вітроводневої енергетики та визначення можливостей кліматичних умов у забезпеченні автономних вітроводневих установок передусім спрямовані на визначення первинної ресурсної бази для виробництва зеленого водню − кадастру територій для потенційного розміщення оншорних та офшорних вітроелектричних станцій, кадастру їх вітрового потенціалу із застосуванням сучасного методичного забезпечення та ГІС-технологій і формування кадастру використання потужностей вітроелектроенергетики з урахуванням вітрового потенціалу та характеристик вітроелектричних установок. Важливими напрямами досліджень є встановлення ефективних систем зберігання водню та комунікацій між ВЕС, виробником водню, сховищем водню та споживачем з урахуванням вимог до розміщення автономних вітроводневих систем та даних вітрового кадастру і нормативних документів.

У місцевостях з великими сезонними коливаннями генерації ВЕС та навантаження важливо точно визначати оптимальне співвідношення між номінальною потужністю вітрової електростанції та потужністю електролізера і розміром водневого накопичувача, оскільки це буде вирішальним для забезпечення достатньої надійності електропостачання та фінансових затрат на встановлення енергосистеми. Водневі технології відіграватимуть важливу роль в об'єднаних енергосистемах, особливо на рівні слабких розподільних мереж з вітроелектростанціями – в умовах України перспективними є райони вздовж узбережжя з високим потенціалом вітру та слабо розвиненими електромережами. Швидка інтеграція вітрових електростанцій у розподілені електромережі може зменшити втрати електроенергії та пошкодження енергетичного обладнання. Одночасно необхідно вирішити проблему забезпечення балансу електроенергії в електромережі. Для детального аналізу виробництва енергії вітру можна використовувати

вейвлет-перетворення, оскільки ця методологія дозволяє більш інформативно оцінити вплив кожного метеорологічного фактора.

Для забезпечення ефективної сумісної роботи технологічного обладнання з виробництва водню та ВЕС необхідно враховувати особливості як вітроустановки, так і електролізера, що за рахунок вітрової електроенергії виробляє водень. Базові критерії багатофакторного кадастру інформації для оптимізації розміщення в Україні підприємств вітроводневої енергетики такі:

- оцінка енергетичного вітропотенціалу в місцях розташування та оцінка наявних потужностей діючих вітроелектростанцій;
- вибір основного технологічного обладнання, оцінка потужності та продуктивності електролізної установки залежно від параметрів електропостачання;
- оцінка водних ресурсів, необхідних для використання у виробництві зеленого водню;
- встановлення вимог технологічних рішень до інфраструктури з урахуванням систем зберігання водню та доставки до споживача;
- формування вимог до автономних вітроводневих систем залежно від типу споживача, а саме з урахуванням множини потреб з енергозабезпечення об'єкта (виробничого, побутового тощо), що характеризується коефіцієнтом графіка навантаження, потужністю джерела живлення, ємністю акумулювального пристрою та множини величин ресурсу енергії вітру з урахуванням географічного місцезнаходження об'єкта, параметрів вітроелектричної установки й технології виробництва водню;
- розробка блок-схем автономних вітроводневих систем з урахуванням вимог споживача, як-от отримання, акумулювання й транспортування водню та забезпечення споживача електричною і тепловою енергією.

Внаслідок виконання науково-дослідної роботи отримано такі результати [4, 5], сформовано перелік об'єктів та параметрів буферних зон навколо них, які мають бути виключені з подальших розрахунків доступних під будівництво оншорних та офшорних ВЕС площ:

- розроблено покрокову методику дослідження вітроенергетичного потенціалу, основану на використанні географічних інформаційних систем і представлено блок-схему методики визначення потенціалів встановленої потужності та середньорічного виробітку електричної енергії ВЕС;
- отримано значення технічного потенціалу встановленої потужності та середньорічного виробітку електричної енергії ВЕС для території України, що становить 726 365 МВт та 1 594 749 млн кВт·год/рік при обмеженні КВНП≥0,2 і 406 721 МВт та 1 040 634 млн кВт·год/рік при обмеженні КВНП≥0,25;
- визначено потенціал підземного зберігання зеленого водню в Україні, що є найдешевшим способом його зберігання при використанні для цієї мети штучних пустот та каверн у покладах кам'яної солі;
- одним з найперспективніших елементів вітроводневої інфраструктури є використання газорозподільної та газотранспортної мережі для комунікації між ВЕС, виробником водню та сховищем водню;
- визначено вимоги до розміщення автономних вітроводневих систем для різних сегментів потужності з урахуванням вітрового кадастру, які для вітроустановок потужністю менше 100 кВт враховують зміни параметрів вітрового потоку залежно від рельєфу місцевості та наявних перешкод.

Внаслідок аналізу комунікацій між ВЕС та виробником водню визначено особливості сумісного використання технологічного обладнання виробництва водню та оншорних і офшорних ВЕС, а також можливості зберігання та доставки водню до споживача. На основі результатів аналітичних досліджень основних напрямів та засобів споживання водню розроблено блок-схеми автономних вітроводневих систем з урахуванням вимог споживача, визначено вимоги до автономних вітроводневих систем залежно від типу споживача та технології виробництва водню. Проведено аналіз комунікацій між блоками автономних вітроводневих систем з урахуванням коливань подачі енергії на виробництво водню та коливань споживання енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Вітроенергетика / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2023. 135 с.
2. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. 492 с.
3. За воднем – майбутнє енергетичної системи України і… незалежність від Росії [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://galychyna.if.ua/analytic/za-vodnem-maybutnye-energetichnoyi-sistemi-ukrayini-i-nezalezhnist-vid-rosiyi/].
4. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України: Видання третє, оновлене. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с.
5. Петренко К. В., Аушева Н. М., Кардашов О. В. Методика оцінки вітроенергетичного потенціалу території України з використанням геоінформаційних систем. Відновлювана енергетика. 2024. № 4. С. 68–81.

УДК 621.548

ВИЗНАЧЕННЯ МЕЖІ ПОТУЖНОСТІ ДЛЯ ДОЦІЛЬНОГО ВИКОРИСТАННЯ АВТОНОМНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ АБО ВІТРОВОДНЕВИХ СИСТЕМ

В. П. Коханєвич[1], М. О. Шихайлов[2], Н. В. Марченко[3], В. В. Коханєвич[4]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України
03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 50,
тел./факс 044- 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Запропоновано критерії для визначення граничного значення потужності вітроелектричної або вітроводневої системи для автономного енергозабезпечення, при якій доцільне використання тієї чи іншої системи.

Ключові слова: *вітроенергетика, вітроелектрична система, вітроводнева система.*

DETERMINATION OF THE POWER LIMIT FOR THE EXPEDIENT USE OF AUTONOMOUS WIND POWER OR WIND-HYDROGEN SYSTEMS

V. Kokhanievich[1], M. Shikhaylov[2], N. Marchenko[3], V. Kokhanievych[4]

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
03143, Kyiv, Metrologichna St., 50
tel./fax 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Criteria are proposed for determining the limiting power value of a wind power or wind-hydrogen system for autonomous power supply, at which the use of one system or the other is expedient.

Key words: *wind energy, wind power system, wind-hydrogen system.*

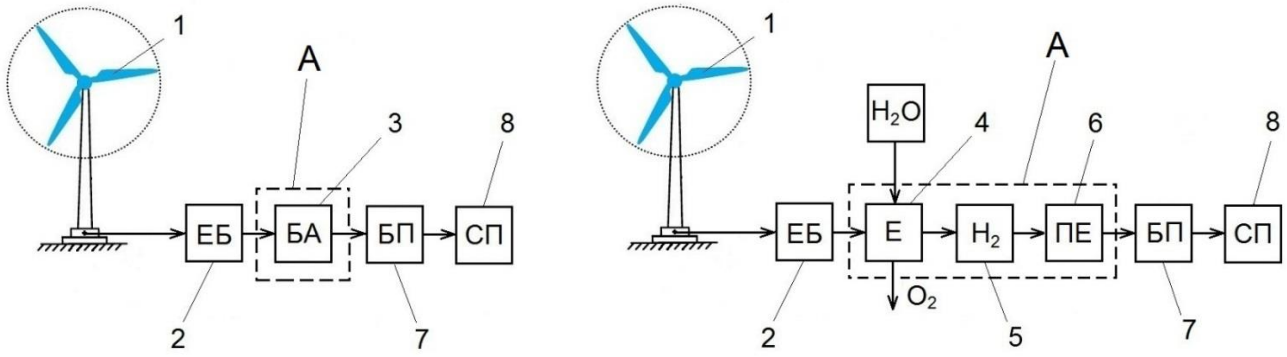
ORCID: [1]0000-0003-0033-1355; [2]0000-0003-1845-9904; [3]0000-0001-9921-9077; 0009-0009-0461-4388

На сьогоднішній день в Україні власних родовищ енергоносіїв не вистачає для забезпечення потреб населення. Крім того потрібно враховувати той фактор, що в світі відбувається поворот до «стійкої низьковуглецевої економіки» та, відповідно, низьковуглецевої енергетики [1].

Одну з основних ролей в цьому переході відіграє вітроенергетика. Особливістю виробітку електроенергії вітроелектричними установками (ВЕУ) є випадкова природа первинного джерела енергії, тобто вітру, а її споживання обумовлено життєвим функціонуванням споживача. Вирішення цієї проблеми – це акумулювання. Якщо у ВЕУ та інших установках на відновлюваних джерелах енергії, які працюють на мережу або паралельно з мережею, є можливість компенсувати нерівність надходження та споживання енергії за рахунок мережі, то в автономних установках такої можливості немає. Сьогодні можна говорити про використання у ВЕУ малої потужності електрохімічного акумулювання (в окремих випадках також теплового). Використання електрохімічних акумуляторів обмежується у ВЕУ потужністю декілька кіловат. Перспективним видається акумулювання за рахунок накопичення водню та його подальшого споживання, що дозволить розширити діапазон використання автономних ВЕУ до десятків і сотень кіловат а також розширити коло споживачів, а саме: невеликі промислові об'єкти, фермерські господарства, туристичні об'єкти тощо. Одним із завдань використання водневого акумулювання є визначення величини потужності, що обумовлює доцільність використання автономних вітроводневих систем замість вітроелектричних систем з електрохімічним акумулюванням.

Розглянемо дві типові автономні системи, які наведені на рис. 1: вітроелектричну (a) і вітроводневу (b). До складу цих систем входять: 1 – вітроелектрична установка; 2 – електронний блок (формує напругу та струм, які надходять від електрогенератора ВЕУ до параметрів, що необхідні для роботи електролізера або заряджання акумуляторів); 3 – блок електрохімічних акумуляторів; 4 – електролізер; 5 – акумулятор водню; 6 – паливні елементи (або інші перетворювачі водню на електроенергію); 7 – блок перетворення (формує струм та напругу, які необхідні споживачу); 8 – споживач. Як видно з рис. 1, для вітроустановок співмірної потужності відмінність двох автономних систем полягає в блоках А та Б. Тобто порівняння вартості електрохімічних акумуляторів, з одного боку, з вартістю електролізера, акумулятора водню та паливних елементів – з іншого дозволить визначити ту межу потужності, починаючи з якої вже буде доцільним використання вітроводневих систем. На рис. 2 наведено залежність вартості ком-

понентів автономних вітроелектричних та вітроводневих систем від їхньої потужності. При цьому кількість та вартість електрохімічних акумуляторів розраховувалися за умови, що резервування буде необхідне на період до 3 днів. Також наведена сумарна вартість електролізера та акумулятора водню (крім того сюди входить система підготовки води).



a *b*

Рис. 1. Автономні системи: a – вітроелектрична; b – вітроводнева

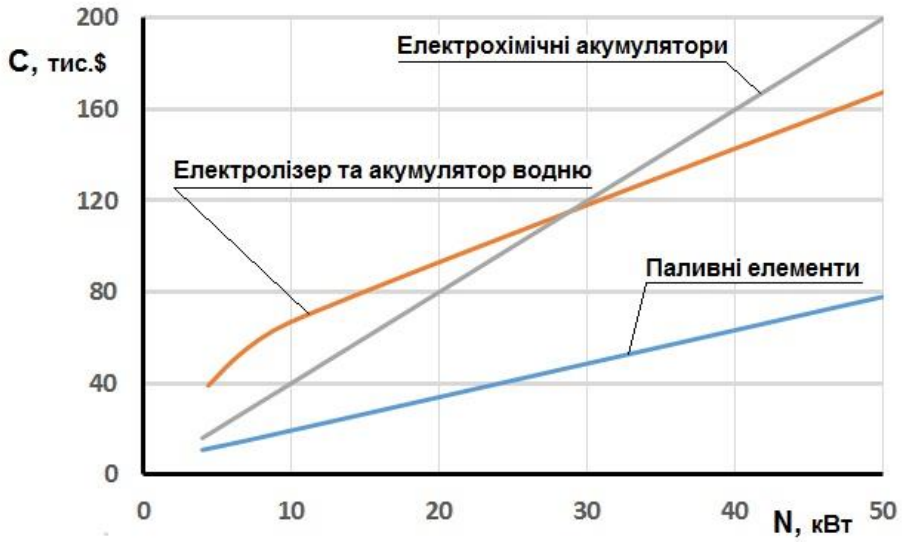


Рис. 2. Залежність вартості компонентів автономних вітроелектричних та вітроводневих систем від їхньої потужності

ВИСНОВОК

На рис. 2 видно: коли потужність досягає 30 кВт, тоді вартість електрохімічних акумуляторів та електролізера з акумуляторами водню зрівнюється, і можна прогнозувати, що за потужності більше 50 кВт вже доцільно використання вітроводневих систем. При цьому необхідно зауважити, що збільшення необхідного періоду резервування понад 3 дні може привести до зменшення цієї межі.

ПОСИЛАННЯ:

1. Огляд сучасної політики ЄС у сфері низьковуглецевої та циркулярної економіки. (Overview of the Modern EU Policies in the Sphere Low Carbon and Circular Economy) / А. Гнап, О. Кабанов, М. Присяжнюк та ін. URL: https://tapas.org.ua/wp-content/uploads/2024/02/Iurydychnyj-zvit.pdf.

УДК 621.311.25

РОЗВИТОК ПРОМИСЛОВОЇ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ В КОНТЕКСТІ СВІТОВОЇ ТЕНДЕНЦІЇ ПОСТУПОВОГО ЗБІЛЬШЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

В. С. Подгуренко[1], В. Є. Терехов[2], О. М. Гетманець[3]

[1]Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
просп. Героїв України, 9, м. Миколаїв, 54050, Україна,
тел.: (050) 558-05-75, e-mail: vspodgurenko@gmail.com,
[2]ТОВ «УК «Вітряні парки України»,
вул. Промислова, 7а, м. Перечин, 89200, Україна,
тел.: (093) 402-42-33, e-mail: vl.terekhov86@gmail.com,
[3]Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна,
площа Свободи, 4, м. Харків, 61022, Україна,
тел.: (067) 574-45-96, e-mail: oleg.m.getmanets@karazin.ua.

Проведено зіставлення осереднених значень номінальної потужності генератора ВЕУ вітропарків України, США, ЄС, Німеччини та Китаю протягом останніх 14 років.

Ключові слова: *вітрова електрична установка, еволюція, номінальна потужність.*

THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL WIND ENERGY IN UKRAINE IN THE CONTEXT OF THE GLOBAL TREND OF PROGRESSIVE INCREASE IN THE RATED POWER OF WIND TURBINES

V. Podhurenko[1], V. Terekhov[2], O. Getmanets[3]

[1] Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Geroiv Ukrainy aven, 9, Mykolaiv, 54050, Ukraine,
phone: (050) 558-05-75, e-mail: vspodgurenko@gmail.com,
[2]"MC" Wind Parks of Ukraine" LLC,
Promyslova str., 7a, Perechin, 89200, Ukraine,
phone: (093) 402-42-33, e-mail: vl.terekhov86@gmail.com,
[3]Kharkiv National V.N. Karazin University,
Svobody sq., 4, Kharkiv, 61022, Ukraine,
phone: (067) 574-45-96, e-mail: oleg.m.getmanets@karazin.ua.

A comparison of the averaged values of the rated power of the wind turbine generator of wind farms in Ukraine, the USA, the EU, Germany, and China over the past 15 years is made.

Key words: *wind turbine, evolution, rated power.*

ORCID: [1]0000-0001-8443-0160; [2]0000-0003-1080-0119; [3]0000-0002-0543-0961.

Після запровадження «зеленого» тарифу та початку будівництва промислових вітрових електричних станцій (ВЕС), в Україні відбувається безперервне зростання потужностей вітрових електричних установок (ВЕУ), що вводяться в експлуатацію. Починаючи в 2011 році з перших ВЕУ потужністю 2,5 МВт за 12 років потужність ВЕУ зросла більш ніж удвічі. Чи відповідає такий темп зростання загальносвітовій тенденції? Для відповіді на поставлене питання доцільно дослідити відповідні темпи розвитку провідних країн у сфері вітроенергетики: Китайської народної республіки (КНР) (1-е місце з виробництва електроенергії з вітру), Сполучених штатів Америки (США) (2-е місце), Федеративної республіки Німеччини (ФРН) (3-є місце) [1] та ЄС.

Як джерела статистичних даних використані щорічні звіти асоціації WindEurope [2], в яких публікуються дані щодо стану вітроенергетики в понад 20 країн Європи, зокрема в Україні (за винятком 2022 р.), щорічні звіти Німецької вітроенергетичної асоціації Bundersverband Energie [3]; щорічні звіти американського науково-дослідницького інституту NREL [4] та дані Китайської вітроенергетичної асоціації [5].

На рис. 1 представлено узагальнені показники зростання середньої потужності ВЕУ вищевказаних країн протягом останніх 14 років. Рисунок наглядно ілюструє наявність оберненої залежності між лідерською позицією з виробництва вітрової електроенергії та середньою потужністю ВЕУ: найменш потужні встановлюються у КНР, трохи потужніші – у США. У 2023 році КНР наздогнала та випередила США за цим показником на 0,1 МВт. Значний відрив від

США та КНР демонструє ЄС в цілому і зокрема ФРН та Україна. Україна до 2024 року демонструвала показники середньої потужності ВЕУ на рівні не нижче ФРН і часом перевищувала їх. Але в 2024 році в Україні зросла кількість встановлень вживаних ВЕУ відносно малої потужності, що, з урахуванням загального зниження кількості встановлених ВЕУ, спричинило різке зниження показника середньої потужності ВЕУ до 2,6 МВт. За винятком вживаних ВЕУ цей показник становить 5,5 МВт.

За темпами зростання потужності ВЕУ на першому місці до 2024 року була Україна із середнім показником у 0,26 МВт на рік, трохи повільніше – ФРН (0,23 МВт на рік), на останніх позиціях – КНР та США (0,16 МВт та 0,12 МВт на рік відповідно).

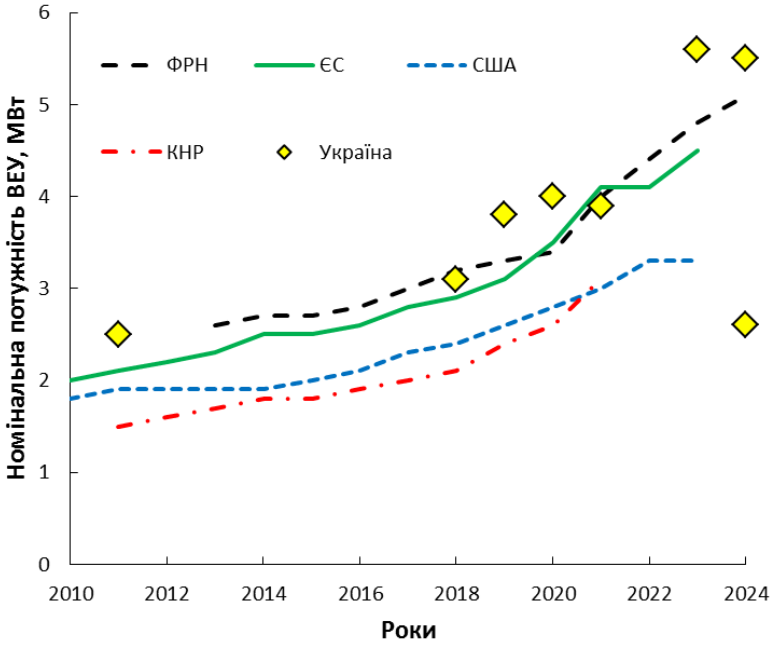


*Рис. 1. Еволюційне зростання середньої номінальної потужності ВЕУ в провідних країнах світу та Україні**

* По Україні в 2024 році представлено два показники: для виключно нових ВЕУ (5,5 МВт) та з урахуванням вживаних ВЕУ (2,6 МВт).

Як видно, країни-лідери у вітроенергетиці – КНР та США, – на противагу вельми поширеному твердженню щодо зниження вартості виробництва електроенергії з відповідним збільшенням потужності ВЕУ, не поспішають встановлювати ВЕУ великої потужності. Беручи до уваги їх територіальні розміри (4-те і 3-тє місце відповідно), ймовірно, це пов'язано з наявністю великих площ з придатними вітровими умовами, що дозволяє встановлювати велику кількість ВЕУ відносно невеликої потужності. Україна та ФРН є значно меншими й посідають, відповідно, 46-те та 63-тє місця за площею. Але різниця між ними досить суттєва – площа ФРН становить лише 60 % площі України. За виявленою тенденцією, середня потужність ВЕУ в Україні мала б бути нижчою, ніж у ЄС та ФРН. Чому наша країна зробила вибір ВЕУ великої потужності – питання відкрите і потребує додаткових досліджень.

ПОСИЛАННЯ

2. Які країни є найбільшими виробниками вітрової енергії. Аналітичний портал «Слово і Діло». URL: https://www.slovoidilo.ua/2024/12/12/infografika/ekonomika/yaki-krayiny-ye-najbilshymy-vyrobnykamy-vitrovoyi-enerhiyi. (дата звернення: 06.03.2025).

3. Wind energy in Europe. Statistics and the outlook. URL: https://windeurope.org. (дата звернення: 06.03.2025).

4. Factsheet: Status Onshore Wind Energy Development in Germany. URL: https://www.wind-energie.de (дата звернення: 06.03.2025).

5. Cost of Wind Energy Review. URL: https://www.nrel.gov. (дата звернення: 06.03.2025).

6. Cai Y., Loi EH., Tung C-L., Wang H. and Zheng J. (2025) Clean energy development and lowcarbon transition in China's power industry. Front. Environ. Sci. 12:1525047. doi: 10.3389/fenvs.2024.1525047

УДК 621.311.25

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ У ЛЬВІВСЬКОМУ РАЙОНІ ЛЬВІВСЬКОЇ ОБЛАСТІ

М. Р. Лопушанська[1], Ю. І. Башинська[2], Ю. Т. Федак[1], В. Я. Сухар[1]

[1]Товариство з обмеженою відповідальністю «ЕКО-ОПТІМА»,
82000, Старосамбірський р-н, Львівська обл., м. Старий Самбір, вул. Лева Галицького, 96а
mariialopushanska @gmail.com
[2]ДУ «Інститут регіональних досліджень ім. М. Долішнього НАН України», 79026 м. Львів, вул. Козельницька, 4

Львівська область є однією з передових областей на заході України за кількістю реалізованих проєктів вітрової енергетики, а також проєктованих об'єктів. Більшість території Львівського району розташована у зоні з середньорічною швидкістю вітру на висоті 100 м до 7,2 м/с. Лише в межах західної частини Городоцької громади, а також на півночі Бібрської та Перемишлянської громад середньорічна швидкість вітру становить понад 7,2 м/с. Загалом у межах Львівського району є чимало перспективних ділянок для реалізації проєктів з вітроенергетики.

Ключові слова: *відновлювана енергетика, вітрова енергетика, відновлювані джерела енергії, швидкість вітру, екологічні обмеження, Львівський район.*

PROSPECTS FOR WIND ENERGY DEVELOPMENT IN THE LVIV DISTRICT OF LVIV REGION

M. Lopushanska[1], Yu. Bashynska[2], Yu. Fedak[1], V. Sukhar[1]

[1]ECO-OPTIMA Limited Liability Company,
96a, Lev Halytsky Street, Staryi Sambir, Lviv region, 82000, Staryi Sambir district, Lviv region
e-mail: mariialopushanska @gmail.com
[2]Dolishniy Institute of Regional Research of NAS of Ukraine, 79026 м. 4 Kozelnytska St., Lviv

Lviv region is one of the leading regions in western Ukraine in terms of the number of completed wind energy projects and those under construction. The majority of the Lviv district is located in the zone with an average annual wind speed of up to 7.2 m/s at an altitude of 100 m. Only within the western part of the Horodok community and in the north of the Bibrka and Peremyshliany communities does the average annual wind speed exceed 7.2 m/s. In general, there are many promising sites for wind energy projects within the Lviv district.

Key words: *renewable energy, wind energy, renewable energy sources, wind speed, environmental restrictions, Lviv district.*

ORCID: [1] 0000-0002-0557-1609.

Львівська область є однією з передових областей на заході України за кількістю реалізованих об'єктів вітрової енергетики,а також проєктованих об'єктів. Для того щоб реалізовувати такі об'єкти передусім необхідно визначити показники середньорічної швидкості вітру на висоті 100 м, встановити всі екологічні обмеження, які можуть бути в межах території, яка планується для реалізації проєкту, також варто врахувати специфіку приєднання об'єкта до Об'єднаної енергетичної системи України, і вже після цього визначати доцільність реалізації проєктів.

Більшість території Львівського району розташована в зоні з середньорічною швидкістю вітру на висоті 100 м до 7,2 м /с. Лише в межах західної частини Городоцької громади, а також на півночі Бібрської та Перемишлянської громад середньорічна швидкість вітру становить понад 7,2 м/с (рис. 1) [1]. Проте для детального визначення показників середньорічної швидкості вітру необхідно провести додаткові заміри вітру на місцевості.

Визначення екологічних обмежень є вкрай необхідним для успішної реалізації проєктів [2]. У межах Львівського району розташовані об'єкти природно-заповідного фонду України, зокрема: РЛП «Равське Розточчя», лісовий заказник «Завадівський», лісовий заказник «Гряда», РЛП «Знесіння», лісовий заказник «Винниківський», лісовий заказник «Любінський», ландшафтний заказник «Липниківський», ландшафтний заказник «Романівський», ландшафтний заказник «Свіржський» та ландшафтний заказник «Лагодівський».

Серед об’єктів Смарагдової мережі у межах Львівського району розташовані: Розточчя (SiteCode: UA0000121), Завадівський (SiteCode: UA0000179), Буське (SiteCode: UA0000343), Стільське горбогір’я (SiteCode: UA0000177) [3].

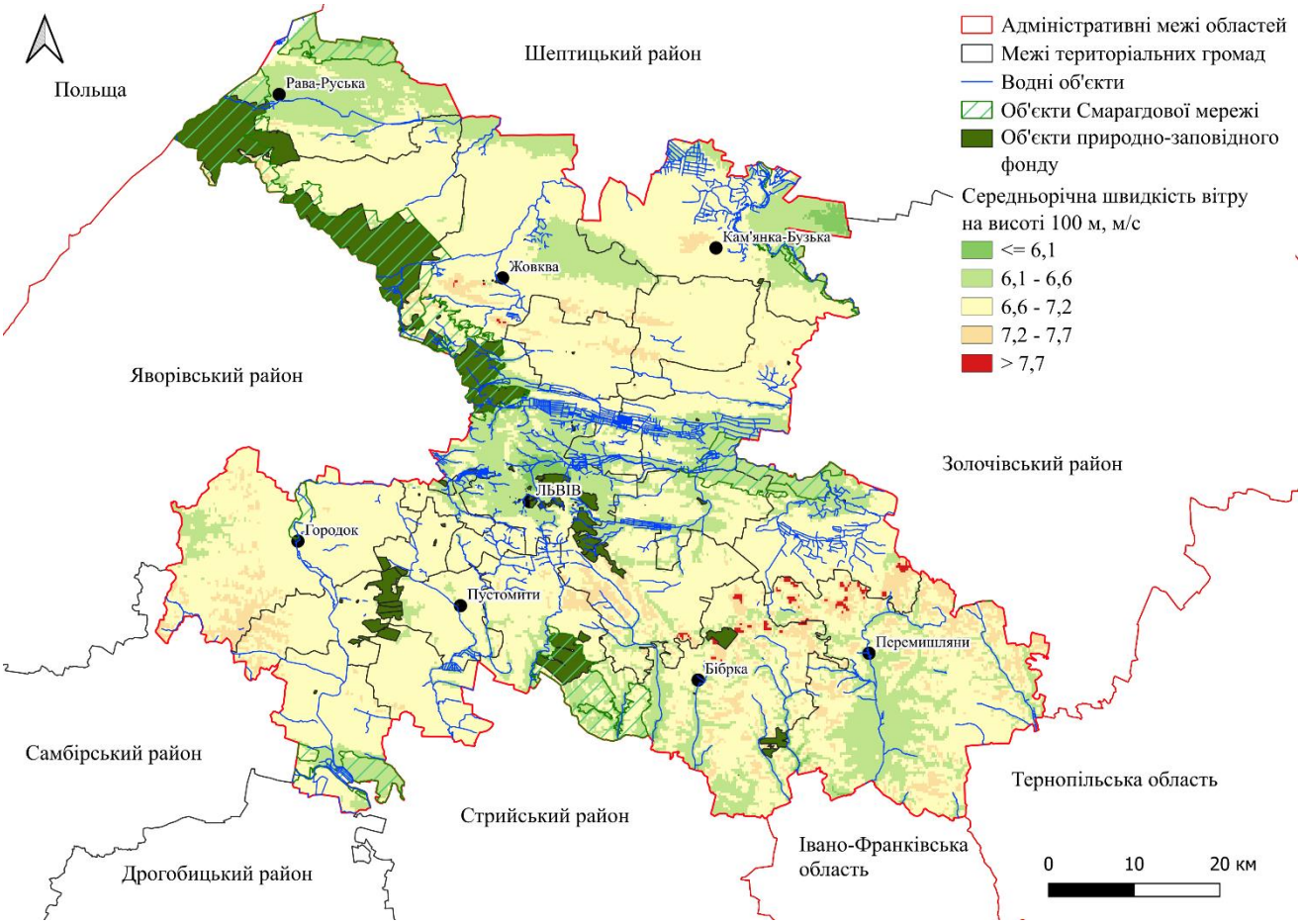


Рис. 1. Середньорічна швидкість вітру на висоті 100 м та об’єкти ПЗФ і території Смарагдової мережі в межах Львівського району Львівської області (Складено за даними [1, 3])

Щодо водних об’єктів, то у межах Львівського району переважають малі річки з прибережно-захисною смугою 25 м [4]. Серед річок, які протікають у Львівському районі, слід виділити такі: Верещиця, Думний Потік, Рата, Полтва, Золота Липа.

Під час проектування об’єктів вітрової енергетики також слід дотримуватись відстаней від житлової забудови. Рекомендованою відстанню згідно з ДСТУ 8339:2015 [5] є 700 м, проте реальна відстань залежить від географічного розташування об’єкта – її слід визначати індивідуально з урахуванням усіх чинників.

Загалом у межах Львівського району є чимало перспективних ділянок для реалізації проєктів з вітроенергетики.

ПОСИЛАННЯ

1. Global Wind Atlas URL: https://globalwindatlas.info/en/ (дата звернення: 04.03.2025).
2. Lopushanska M., Ivanov Ye., Bashynska Yu., Lopushanskyi O., Tsyganok L. Geoinformation modelling for the selection of wind energy project sites. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024» (October 7–9, 2024, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine). DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510051 (дата звернення: 04.03.2025).
3. Emerald Network - General Viewer URL: https://emerald.eea.europa.eu (дата звернення: 04.03.2025).
4. Водний кодекс України URL https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/213/95-%D0%B2%D1%80 (дата звернення: 04.03.2025).
5. ДСТУ 8339:2015 Вітроенергетика. Вітроелектростанції. Оцінення впливу вітроелектростанцій на навколишнє середовище.

УДК 621.311.24

АНАЛІЗ ДОБОВИХ ГРАФІКІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ

О. В. Згуровець[1], В. О. Дерій[2], Т. П. Нечаєва[3]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (044) 294-67-35, e-mail: oleks.zgur@gmail.com

Представлено результати досліджень добових графіків виробництва електроенергії вітровими електростанціями, проаналізовано середньомісячні та середньорічні коефіцієнти використання встановленої потужності. Розглянуто підхід до визначення потреб ВЕС у системах накопичення електроенергії.

Ключові слова: *вітрові електростанції, коефіцієнт використання встановленої потужності, ОЕС України, графік електричної потужності, акумуляційні системи накопичення енергії.*

ANALYSIS OF THE DAILY POWER OUTPUT PROFILES OF WIND POWER PLANTS IN UKRAINE'S INTEGRATED POWER SYSTEM

O. Zgurovets[1], V. Derii[2], T. Nechaieva[3]

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (044) 294-67-35, e-mail: oleks.zgur@gmail.com

This paper presents the findings of research on the daily electricity generation profiles of wind power plants, including an analysis of their monthly and annual capacity factors. An approach to determining wind farm energy storage requirements is examined.

Key words: *wind power plants, capacity factor, Integrated Power System of Ukraine, power output profiles, energy storage systems.*

ORCID: [1]0000-0001-8439-9781; [2]0000-0002-5689-4897; [2]0000-0001-9154-4545

Активне збільшення частки відновлюваної енергетики, зокрема вітрових електростанцій, у складі ОЕС України зумовлює потребу в детальному аналізі їх впливу на роботу енергосистеми [1–3]. Значні коливання потужності, притаманні вітроенергетичним установкам, вимагають застосування додаткових балансувальних механізмів, до яких належать акумуляційні системи та гнучкі резервні потужності.

Важливими показниками ефективності ВЕС є середньомісячні та середньорічні коефіцієнти використання встановленої потужності (КВВП). За підсумками обробки статистичних даних за 2017–2019 роки (в яких спостерігалися мінімальні обсяги обмежень) встановлено, що середньорічні значення КВВП вітрових електростанцій в Україні становили 28,2, 30,3 та 34 % відповідно. Такі результати близькі до середньозважених показників у світі (близько 30 % станом на 2016–2017 роки [4]).

При цьому максимальні КВВП зафіксовані в осінньо-зимовий період, а мінімальні — у весняно-літній. Варто зазначити, що величина КВВП залежить як від природно-кліматичних особливостей, так і від технічного стану обладнання, зокрема від проведення планових ремонтів.

Для прогнозованого та стабільного функціонування ВЕС можливе використання акумуляційних систем накопичення енергії (СНЕ) [5–8]. Щоб визначити, скільки саме електроенергії потрібно акумулювати, досліджувалися добові, тижневі та місячні графіки роботи ВЕС. Припускалося, що до мережі станція видає енергію лише на рівні середнього значення за певний період, а перевищення цього рівня накопичується у СНЕ.

На основі аналізу добових графіків ВЕС ОЕС України за 2017–2019 роки з'ясувалося, що найбільша потреба в акумулюванні енергії (приблизно 1238 МВт·год) виникла один раз на рік (у 2018 році). Однак якщо розглядати ймовірнісні підходи (наприклад, задовольняти 85–90 % сценаріїв), то достатньо менших обсягів акумуляції, що значно скорочує

капітальні витрати. Зокрема, за потреби покривати 90 % випадків знадобиться від 1,94 до 1,95 МВт·год ємності на 1 МВт встановленої потужності, тоді як для 100%-го покриття піків цей показник істотно збільшується.

Висновки

Коефіцієнти використання встановленої потужності (КВВП) у межах 28–34 % (для 2017–2019 років) підтверджують, що вітрові електростанції України демонструють ефективність, порівнянну зі середньозваженими світовими значеннями.

Врахування ймовірнісного підходу до покриття максимальних коливань (наприклад, 90 % випадків) дає змогу суттєво зменшити розрахункову ємність акумуляторних систем і, відповідно, оптимізувати фінансові витрати.

ПОСИЛАННЯ

1. Zgurovets, O., Kulyk, M. (2023). Application of Energy Storage for Automatic Load and Frequency Control. In: Kyrylenko, O., Denysiuk, S., Derevianko, D., Blinov, I., Zaitsev, I., Zaporozhets, A. (eds) Power Systems Research and Operation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 220. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17554-1_4 (дата звернення: 06.03.2025).
2. Дерій В. О. Накопичувачі електричної енергії. Системні дослідження в енергетиці. Вип. 1(72) 2023. С. 12–24. https://doi.org/10.15407/srenergy2023.01.012 (дата звернення: 04.03.2025).
3. Zaporozhets, A., Kostenko, G., Zgurovets, O., Deriy, V. Analysis of Global Trends in the Development of Energy Storage Systems and Prospects for Their Implementation in Ukraine Studies in Systems, Decision and Control, 2024, 512. P. 69–87. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44772-3_4 (дата звернення: 06.03.2025).
4. Renewable Power Generation Costs in 2017. IRENA. URL: https://www.irena.org/publications/2018/Jan/Renewable-power-generation-costs-in-2017 (дата звернення: 06.03.2025).
5. Handbook on battery energy storage system. URL: https://www.adb.org/sites/default/files/publication/479891/handbook-battery-energy-storage-system.pdf (дата звернення: 06.03.2025).
6. Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2017/Oct/IRENA_Electricity_Storage_Costs_2017.pdf (дата звернення: 06.03.2025).
7. Sandia National Laboratories/DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. URL: https://prod-ng.sandia.gov/techlib-noauth/access-control.cgi/2015/151002.pdf (дата звернення: 06.03.2025).
8. International Energy Agency Prospects for Large-Scale Energy Storage in Decarbonised Power Grids. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/6bb67be5-0b74-403f-ac02-395c3f3a0762/energy_storage.pdf (дата звернення: 06.03.2025).

MACHINE LEARNING IN RENEWABLE ENERGY: WIND FARM SITE SELECTION IN POLAND

A. Amsharuk

Faculty of Civil Engineering and Environmental Sciences, Bialystok University of Technology,
45E Wiejska str., Białystok, Poland, 15-351
phone: (048) 731-960-630, e-mail: artur.amsharuk@gmail.com

The transition to renewable energy requires efficient site selection for wind farm deployment. This study applies a machine learning (ML) approach to optimize wind turbine siting in Poland, addressing the limitations of traditional multi-criteria decision-making (MCDM) methods. A multilayer perceptron (MLP) model was trained on a dataset of 28 spatial and environmental features, including wind speed, power density, land use, and protected areas. The model was validated using 100,000 randomly selected points and applied to identify suitable locations under real-world constraints. Results indicate that ML provides reliable predictions, aligning well with existing wind farms and regulatory frameworks, with the highest suitability found in coastal regions.

Key words: *wind energy, wind farm, machine learning, spatial analysis, GIS, Poland.*

ORCID: 0000-0001-6012-1937

Introduction

As global energy demands rise and climate change concerns intensify, wind energy emerges as a sustainable and economically viable alternative to fossil fuels. Wind power is projected to play a crucial role in Europe's energy transition, with Poland actively expanding its wind energy capacity. Traditional site selection methods, such as MCDM techniques [1–3], often rely on subjective expert input, limiting scalability. This study explores ML [4–6] as an alternative, leveraging spatial and environmental data to enhance site selection objectivity and accuracy.

Methodology

The study employs an MLP neural network to analyze 28 features from various data sources, including wind conditions, topography, land use, and environmental constraints. The dataset consists of existing wind turbine locations and randomly generated points, standardized and processed using the StandardScaler function. The model architecture includes three hidden layers (64, 128, and 64 neurons), optimized with GridSearchCV. Training utilized a 70-15-15 split for training, validation, and testing, employing the Adam optimizer with a learning rate of 0.01. The model was evaluated using precision, recall, F1-score, MCC, Cohen's Kappa, and AUC-ROC.

Results

The MLP model demonstrated high predictive accuracy, outperforming traditional MCDM methods in identifying suitable wind farm locations. The highest suitability was found in coastal regions, consistent with existing wind farms and previous spatial analyses. However, inland and mountainous regions exhibited lower suitability due to terrain constraints. The model successfully identified new potential locations for wind energy expansion in Poland based on existing wind turbines in Poland and a map of suitable areas for wind energy development (Figure).

Discussion and Conclusion

Compared to conventional methods, ML reveals hidden spatial patterns and improves predictive accuracy. The model's scalability and adaptability make it a valuable tool for policymakers and investors. However, limitations remain, particularly in integrating social acceptance factors and ensuring data completeness. Future work should incorporate socio-economic considerations and expand the model's applicability beyond Poland. This study demonstrates the effectiveness of ML in wind farm site selection, offering a scalable and objective approach to optimizing renewable energy planning. While challenges exist, ML-based methodologies provide valuable insights for policymakers and investors, supporting the transition to sustainable energy systems.

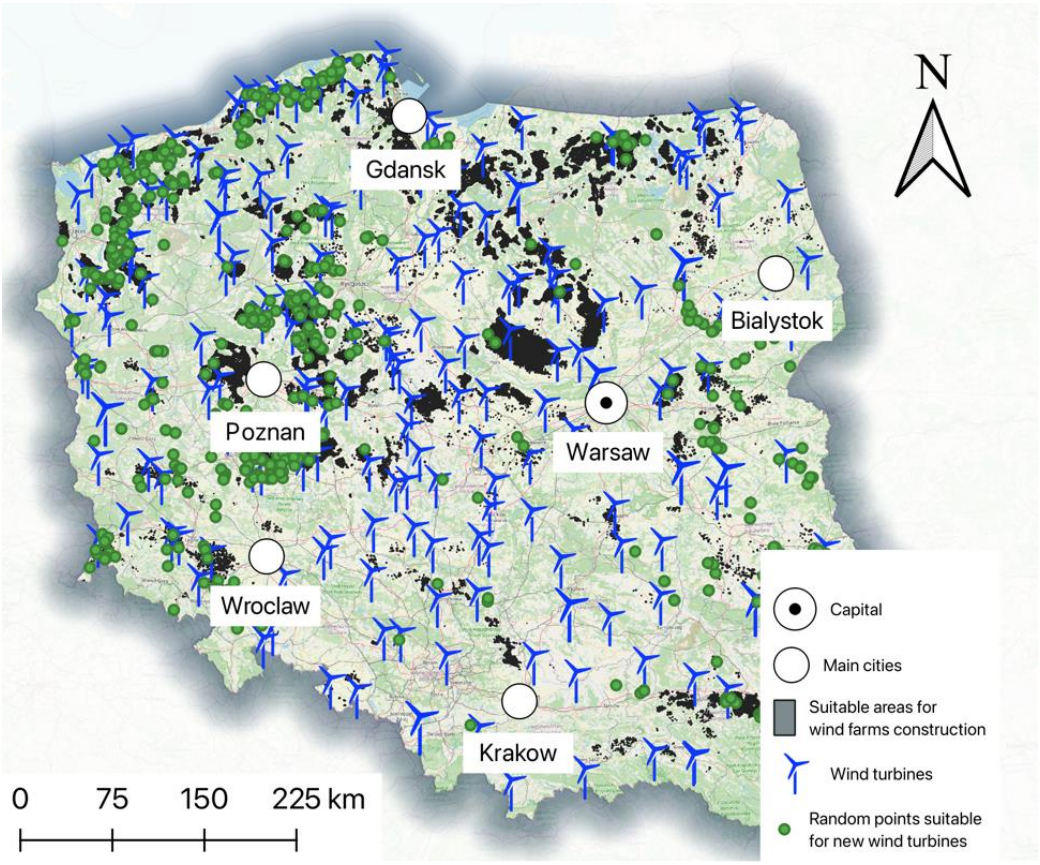


Figure. Map of suitable random points for new wind turbine construction (blue color – existing wind turbines, green color – random points suitable for new wind turbine construction, black color – suitable areas)

REFERENCES

1. Amsharuk, A.; Łaska, G. A Review: Existing Methods for Solving Spatial Planning Problems for Wind Turbines in Poland. Energies (Basel) 2022, 15, 8957, doi:10.3390/EN15238957/S1.
2. Amsharuk, A.; Łaska, G. The Approach to Finding Locations for Wind Farms Using GIS and MCDA: Case Study Based on Podlaskie Voivodeship, Poland. Energies (Basel) 2023, 16, 7107, doi:10.3390/EN16207107/S1.
3. Amsharuk, A.; Łaska, G. Site Selection of Wind Farms in Poland: Combining Theory with Reality. Energies 2024, Vol. 17, Page 2635 2024, 17, 2635, doi:10.3390/EN17112635.
4. Bilgili, A.; Arda, T.; Kilic, B. Explainability in Wind Farm Planning: A Machine Learning Framework for Automatic Site Selection of Wind Farms. Energy Convers Manag 2024, 309, 118441, doi:10.1016/J.ENCONMAN.2024.118441.
5. Sari, F.; Yalcin, M. Investigation of the Importance of Criteria in Potential Wind Farm Sites via Machine Learning Algorithms. J Clean Prod 2024, 435, 140575, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2024.140575.
6. Petrov, A.N.; Wessling, J.M. Utilization of Machine-Learning Algorithms for Wind Turbine Site Suitability Modeling in Iowa, USA. Wind Energy 2015, 18, 713–727, doi:10.1002/WE.1723.

УДК 681.5:621.311.24:004.941

МОДЕЛЬНО-ОРІЄНТОВАНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРОБКИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ВІТРОВИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ З ІНТЕГРАЦІЄЮ D ГАЛУЗЕВІ СИМУЛЯТОРИ

Н. В. Курилко[1], Р. М. Федоришин[2]

Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна,
тел.: (066) 920-88-94, e-mail: nazarii.v.kurylko@lpnu.ua, roman.m.fedoryshyn@lpnu.ua

Запропоновано підхід до розробки систем керування ВЕС з автоматичною генерацією коду для цільових платформ та верифікації в галузевих симуляторах. Рішення скорочує шлях від технічних вимог до прототипу. Інтеграція через API Annex G IEC 61400-27-2 дозволяє тестувати алгоритми без розкриття коду.

Ключові слова: *ВЕС, модельно-орієнтоване проєктування, автоматична генерація коду, цифровий двійник, DLL, Simulink.*

MODEL-BASED APPROACH FOR THE DEVELOPMENT OF WIND POWER PLANT CONTROL SYSTEMS WITH INTEGRATION INTO INDUSTRY SIMULATORS

N. Kurylko[1], R. Fedoryshyn[2]

Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine
phone: (066) 920-88-94, e-mail: nazarii.v.kurylko@lpnu.ua, roman.m.fedoryshyn@lpnu.ua

This paper proposes a model-based approach for the development of wind power plant (WPP) control systems, combining automatic code generation for target platforms with verification in industry-standard simulators. The approach shortens the development cycle from technical requirements to a working prototype. Integration via the Annex G API of IEC 61400-27-2 enables testing of control algorithms while protecting the intellectual property by avoiding source code disclosure.

Key words: *WPP, model-based design, automatic code generation, digital twin, DLL, Simulink.*

ORCID: [1]0009-0001-5003-9662; [2]0000-0002-1972-8662

Частка вітрових електростанцій (ВЕС) у світовій генерації невпинно зростає, водночас мережеві кодекси стають жорсткішими та різняться в різних країнах [1]. Тому постає потреба у швидкому розробленні та адаптації систем керування ВЕС до умов конкретного ринку.

Метою є розробити підхід, що поєднує модельно-орієнтоване проєктування з автоматичною генерацією коду, дозволяючи:

- швидко переходити від технічних вимог до прототипу;
- виконувати багаторівневу верифікацію алгоритмів у середовищах DIgSILENT PowerFactory, PSCAD тощо;
- розгортати отриманий код на цільових апаратних платформах (ПЛК (програмовані логічні контролери), індустріальні контролери тощо).

Центральною складовою запропонованого підходу є розробка алгоритмів керування у MATLAB/Simulink з подальшою автоматичною генерацією коду для різних цільових платформ. Окрім самого контролера ВЕС (2) система моделювання охоплює: (1) модель інтерфейсу оператора мережі, (7) модель електромережі, (4) модель комунікаційних каналів, (5) модель вітрового потоку і (6) модель вітрових турбін. Така комплексна структура дає змогу ретельно верифікувати роботу контролера вже на етапі симуляції, істотно зменшуючи ризики під час його реального впровадження. Параметри моделі (3) доцільно зберігати в окремому конфігураційному файлі, що забезпечить узгодженість налаштувань як для моделювання в Simulink, так і для верифікації моделей в інших галузевих симуляторах та подальшого виконання алгоритмів на системах реального часу, що керують ВЕС.

Оператори електромереж зазвичай вимагають передати цифрову модель контролера ВЕС, щоб верифікувати її в умовах, максимально наближених до реальної експлуатації ВЕС. Інтеграція таких моделей у провідні галузеві си-

мулятори — DIgSILENT PowerFactory, PSCAD тощо — може здійснюватись через стандартизований API Annex G стандарту IEC 61400-27-2 [2], який регламентує обмін даними між симулятором і динамічною бібліотекою з алгоритмом керування. На базі штатної цільової конфігурації Simulink Embedded Coder *ert_shrlib.tlc* створено модифікований варіант, що автоматично формує повний комплект вихідних C/H-файлів, скриптів збирання згідно з вимогами Додатку G. Згенерований код може бути скомпільований:

- як 32- чи 64-бітну DLL для Windows — для прямого підключення до PowerFactory, PSCAD або інших галузевих симуляторів;
- як окремий виконавчий модуль для платформ реального часу, що працюють на промислових контролерах та безпосередньо керують реальними ВЕС [3].

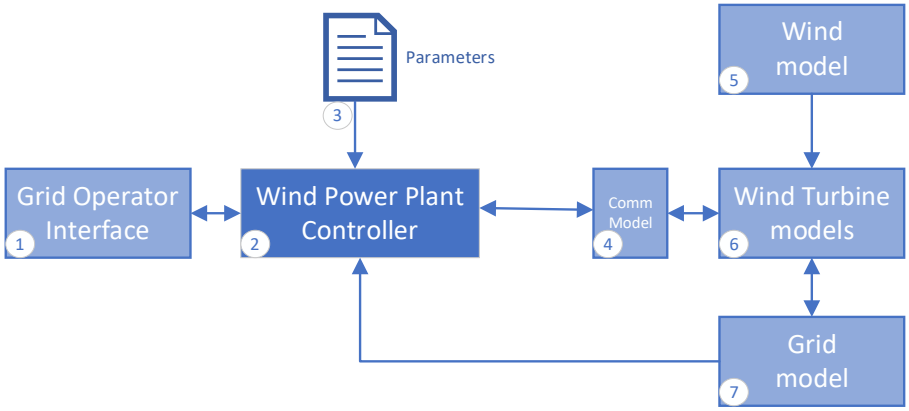


Рис. 1. Структурна схема моделі керування вітровою електростанцією в середовищі Simulink

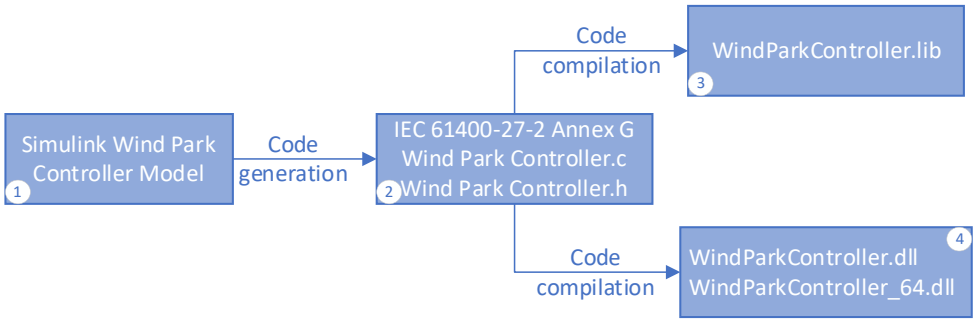


Рис. 2. Схема автоматизованої генерації коду моделі контролера ВЕС

Запропонований модельно орієнтований підхід з автоматичною генерацією коду формує єдиний процес — від розроблення алгоритмів у MATLAB/Simulink до їх виконання як на безпосередній цільовій платформі, так і в провідних галузевих симуляторах. Поєднання цих методів забезпечує комплексну валідацію системи керування, підвищує її надійність і прискорює впровадження в промислові умови. Завдяки використанню стандартизованого інтерфейсу Annex G IEC 61400-27-2 модель контролера може бути передана оператору електромережі у вигляді скомпільованої бібліотеки, що захищає інтелектуальну власність розробника, одночасно гарантуючи прозорість функціонування алгоритмів для зовнішніх випробувань.

ПОСИЛАННЯ

1. International Energy Agency, *World Energy Outlook 2023*, Paris, France: IEA, 2023. [Online]. Available: https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2023
2. International Electrotechnical Commission, *IEC 61400-27-2:2020 — Wind energy generation systems — Electrical simulation models-model validation*, Geneva, Switzerland: IEC, 2020. [Online]. Available: https://webstore.iec.ch
3. T. Chmielewski, P. Mars, M. Miśkiewicz, and P. Błaszczyk, “Universal DLL-based components for simulations of multiphysical electro-thermal systems,” *Przegląd Elektrotechniczny*, vol. 93, no. 9, pp. 78–82, 2017, doi: 10.15199/48.2017.09.15. [Online]. Available: https://pe.org.pl/articles/2017/9/15.pdf

УДК 621.039.533.

ПОРІВНЯННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВІТРОВИХ ТУРБІН З ВИКОРИСТАННЯМ ПАРАМЕТРІВ РОЗПОДІЛУ ВЕЙБУЛЛА ПРИ ОЦІНЮВАННІ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ

О. Г. Молибог, Д. Ю. Ткаченко

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (095) 505-90-04, e-mail: almolibog@gmail.com

У сучасних умовах вітрові електричні станції можуть стати надійним, хоча і складно прогнозованим, джерелом електричної енерегії, яке має низку переваг перед іншими видами генерації, що віикорстовують відновлювані джерела енергії. Тому питання якісного девелопменту проєктів ВЕС на сьогдні стає дедалі актуальнішим. Крім того, однією з невідкладних задач муніципальних громад є питання якісної оцінки потенціалу відновлюваних джерел енергії для забезпечення енергонезалежності регіону при розробці муніципальних енергетичних планів та інших стратегічних документів. Існує велике різноманіття програмного забезпеченн,я проте його використання доступно тільки профільним спеціалістам та вимагає певних, часто значних, коштів. Отже, витрати на попередню оцінку вітрового потенцілу для окремого проєкту або громади здебільшого недоречні, тому мають бути альтрнативні засоби для вирішення означених питань. Один з таких засобів запропановано нижче. Він полягає у використанні функції розподілу Вейбулла для спрощеного, повнішого та швидкого аналізу за даними з відкритих джерел.

Ключові слова: *вітрова енергетична установка, розподіл Вейбулла, річний обсяг виробітку електричної енергії, повторюваність, коефіцієнт використання потужності.*

COMPARISON OF THE EFFICIENCY OF WIND TURBINES USING THE WEIBULL DISTRIBUTION PARAMETERS FOR ENERGY PRODUCTION ASSESSMENT

O. Molyboh, D. Tkachenko

Institute of renewable energy Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
Metrolohichna str.50, Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (095) 505-90-04, e-mail: almolibog@gmail.com

In modern conditions, wind power plants can become a reliable, although difficult-to-predict, source of electricity, with a number of advantages over other types of generation using renewable energy sources. Therefore, the issue of quality development of wind power projects is becoming more and more relevant today. Additionally, one of the urgent tasks for municipal communities is the proper assessment of the potential of renewable energy sources to ensure energy independence in the region when developing municipal energy plans and other strategic documents. There is a wide variety of software available, but its use is only accessible to specialized professionals and requires significant costs. Therefore, the expenses for the preliminary assessment of wind potential for a specific project or community are often inappropriate, so alternative means of solving these issues must be found. One such method is proposed below. It involves using the Weibull distribution function for a simplified, more comprehensive, and quicker analysis based on data from open sources.

Keywords: *wind power plant, Weibull distribution, annual electricity production volume, frequency, capacity utilization factor.*

Україна стоїть на порозі бурхливого росту генерувальних потужностей, які використовують альтернативні джерела енергії (ВДЕ), бо іншого, швидшого та менш витратного, варіанта відновлення електроенергетичної системи, на превеликий жаль, зараз не існує. Підтвердженням цієї тези є значна кількість технічних умов, виданних останнім часом різними установами, та проєктів ВДЕ, які перебувають у процессі девелопменту. З огляду на ефекти масштабу, коли доля нових об'єктів ВДЄ зростає, здатність таких електричних станцій працювати за проєктними параметрами стає дедалі важливішою, а визначення робочих параметрів електростанції на етапі передпроєктної роботи

допоможе зробити негарантовані джерела енергії більш прогнозованими. Іншим ключовим фактором є необхідність розробляти в регіонах низку стратегічних документів щодо питань енергоефективності, забезпеченості відновлюваними джерелами тощо. Отже, питання швидкої оцінки вітрового потенціалу як одного з відновлюваних джерел є як ніколи актуальним.

Для аналізу вітрового потенціалу пропонується використовувати усереднену за певний період повторюваність вітру з відповідною швидкістю. Джерелом даних можуть бути відомі інтернет-ресурси WRDB: Wind Resource Database [1] та Wind prospecting [2], з яких можна отримати дані реналізу погодинних вимірів швидкості вітру на висотах 100–200 м, або параметри розподілу вірогідності Вейбулла. Визначенню параметрів функції розподілу Вейбулла та повторюваності данних присвячино чимало робіт [3, с. 52–56; 4, с. 82–83], а оцінка річного виробітку електричної енерегії з використанням параметрів розподілу Вейбулла є одним зі стандартизованих підходів.

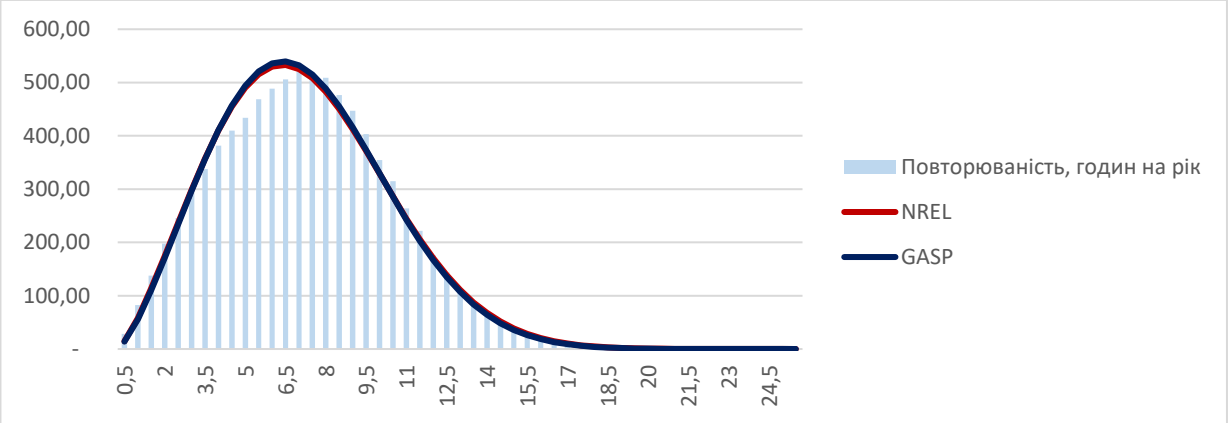


Рис. 1. Порівняння результатів щодо повторюваності швидкості вітру для тих самих координат

На діаграмі (рис. 1) показано, що параметри розподілу Вейбулла, отримані з погодинних значень (крива NREL), майже повторюються відтвореним графіком розподілу за данними вітрового атласу (крива GASP-1.0) і практично збігаються з гістограмою повторюваності, отриманою з погодинних вимірів для висоти 100 м.

Отже, відтворена за параметрами розподілу Вейбулла повторюванність шивдкості вітру за рік може біти використана для визначеня та оцінки річного виробництва електричної енергії, порівняння ефективності вітрових турбін та для подальшої оцінки втрат на передачу виробленої енергії від ВЕУ до точки приєднання до мережі загального користування. Наприклад, порівнюючи графіки продуктивності для двох вітрових турбін з однаковим діаметром вітроколеса в 160 м та різними номінальними потужностями (для порівняння взято вітрові турбіни потужністю 4+ МВт та 7+МВт), можна зробити висновок, що потужніша вітрова турбіна є також і продуктивнішою.

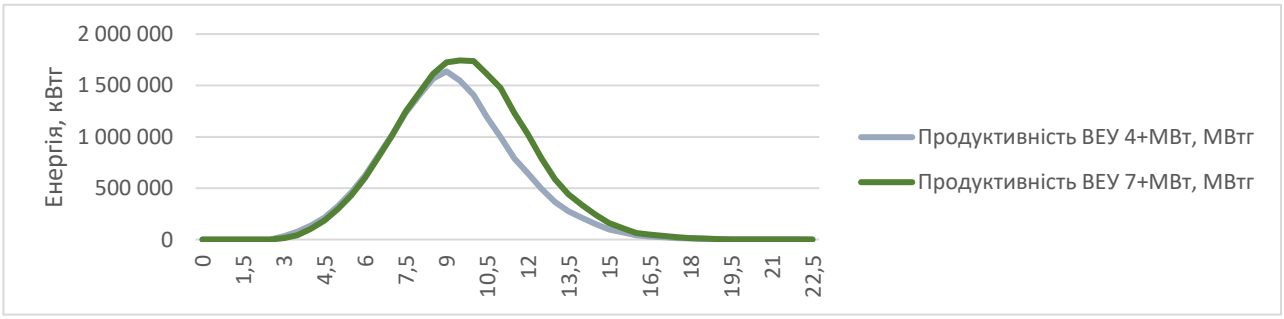


Рис. 2. Порівняння продуктивності ВЕУ з однаковим діаметром вітроколеса та різними номінальними потужностями

Проте вітрові умови на більшості території України не дають змоги розкрити повний потенціал потужних ВЕУ; крім того, для більшості з них для досягнення економічної ефективності доцільно використовувати вищі башти, що додає складношів під час транспортування їхніх компонентів і призводить до збільшення капітальних витрат. З іншого боку, менш продуктивні та менш потужні турбіни здебільшого будуть ефективнішими й матимуть вищий коефіцієнт використання встановленої (номінальної) потужності (КВВП або КВНП). Для порівняння в розглянутому випадку

КВПП $_{\text{ВЕУ 4+МВт}}$ – 0,45
КВПП $_{\text{ВЕУ7+МВт}}$ – 0,34.

Аналізуючи дані, наведені на рис. 3, можна дійти висновку, що вітрові турбіни нижчої потужності в існуючих умовах вітрового потенціалу більшу кількість годин працюють в номінальних параметрах та близьких до них. Також варто зауважити, що вітрові станції, збудовані із застосуванням ВЕУ меншої потужності, будуть більше часу працювати на номінальній потужності протягом року, що є безперечною перевагою в умовах паралельної роботи з енергосистемою України, та, як уже було показано вище, ефективніше використовуватимуть встановлену потужність ВЕС завдяки більшій кількості годин роботи в номінальному режимі.

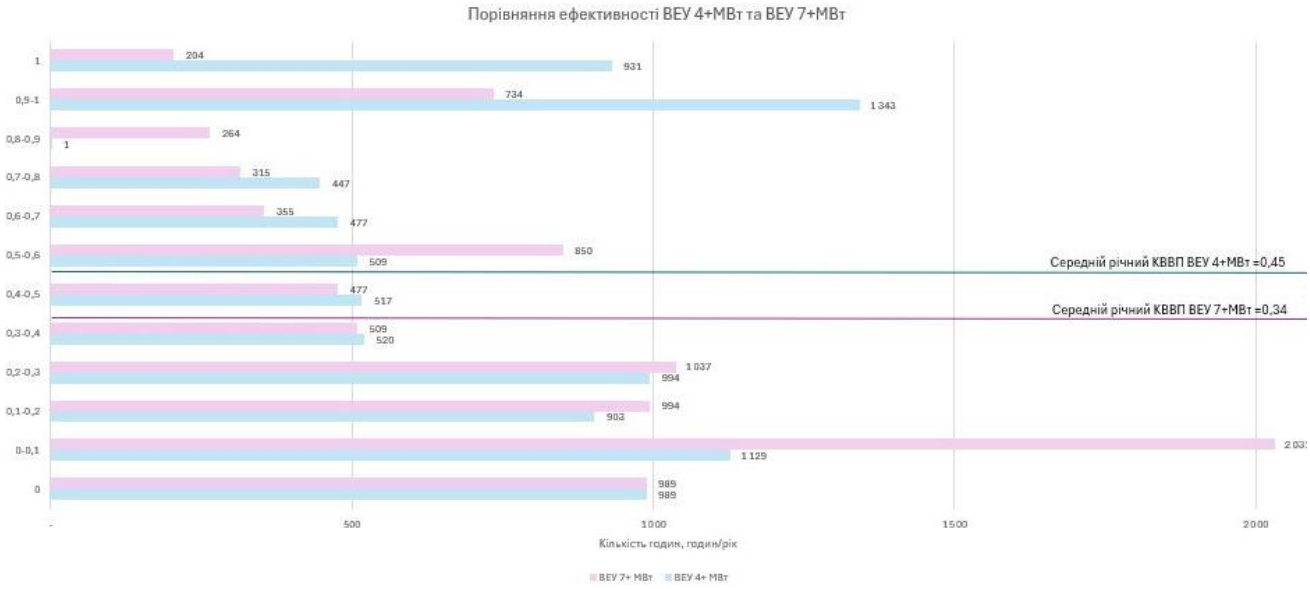


Рис. 3. Порівняння ефективності двох ВЕУ різної потужності з однаковим діаметром вітрового колеса

Основна мета запропонованого підходу – показати важливість ураховування не тільки середньої швидкості вітру в точці вимірювання, але і форми функції повторюваності швидкості вітру протягом року для майданчика. Варто наголосити на певній простоті запропонованого методу, адже всі обчислення можуть бути виконані базовими засобами офісного пакета MS Office. Також результати запропонованого методу можуть бути використані для попередньої оцінки загального обсягу втрат електричної енергії на передачу від генератора ВЕУ до точки приєднання вітрової електричної станції без застосування спеціалізованого програмного забезпечення та за даними з загальнодоступних джерел.

ПОСИЛАННЯ

1. WRDB: Wind resources data base URL: https://wrdb.nrel.gov/ (дата звернення: 22.01.2025).
2. WindPROSPECTING be EMD International A/S URL: https://www.windprospecting.com/ (дата звернення:23.01.2025)
3. Н. О. Костогризова, В. В. Дубровська, В. І. Шкляр. Статистичний аналіз результатів вимірів швидкості вітру. Енергетика: економіка, технологія, екологія. 2014. № 2.
4. Кравчишин В. С., Медиковський М. О., Галущак М. О. Моделювання енергетичного потенціалу вітрової електричної станції. 2016.
5. IEC 61400-1:2014 Wind turbines – Part 1: Design requirements. Edition 3.1.

УДК 621.311.245:681.5](045)

СИСТЕМА КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ВІТРУ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ ВЕУ

О. Я. Кравченко

НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського», факультет електроенерготехніки та автоматики,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (096) 479-33-03, e-mail: kravchenko.oleksii@lll.kpi.ua

Пі час розв'язання поставлених у роботі задач розглядалися можливості програмованих мікроконтролерів та їх взаємодія з зовнішніми пристроями та приводом вітроенергоустановок.

Ключові слова: *короткострокове прогнозування, регулювання кута атаки, датчики швидкості та напрямку вітру, контролер, середньобагаторічні спостереження.*

A SHORT-TERM WIND FORECASTING SYSTEM FOR OPTIMISING WIND POWER PLANTS

O. Kravchenko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Faculty of Electric Power Engineering and Automatics,
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (096) 479-33-03, e-mail: kravchenko.oleksii@lll.kpi.ua

In solving the tasks set in this work, the capabilities of programmable microcontrollers and their interaction with external devices and the drive of wind turbines were considered.

Key words: *short-term forecasting, angle of attack control, wind speed and direction sensors, controller, medium-term weather observations.*

ORCID: 0009-0004-9346-9832.

У сучасних умовах розвиток відновлюваної енергетики є одним з ключових пріоритетів для більшості країн світу. Вітроенергетика посідає провідне місце серед нетрадиційних та відновлюваних джерел енергії. Але ефективність цього джерела енергії істотно залежить від точності прогнозування вітру.

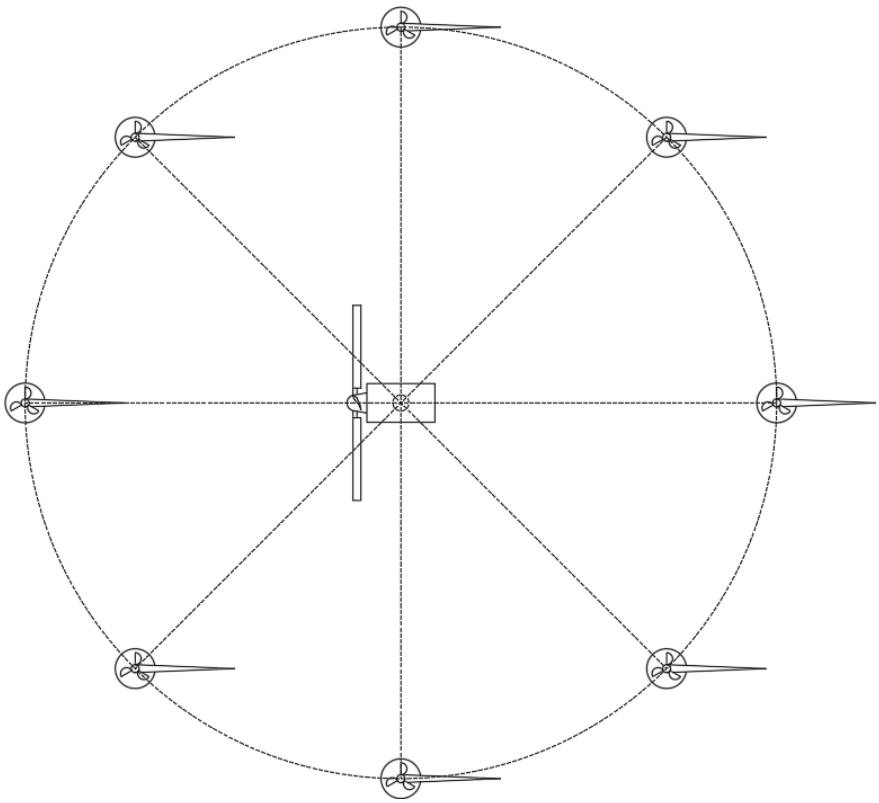
Короткострокове прогнозування швидкості вітру може відігравати значну роль у забезпеченні стабільної роботи вітроенергоустановок. Воно дає змогу відповідним механізмам та операторам оптимізувати роботу відповідних вузлів та агрегатів, мінімізувати ризики перевантажень і підвищити загальну надійність електропостачання.

У загальному випадку системи регулювання кута атаки лопатей та кута повороту площини ротора відносно вітру вітроагрегата дозволяють значно згладити рівень генерації. Проте це згладжування фактично відбувається з певним запізненням, оскільки механізми виміру параметрів вітру розташовіні безпосередньо на ВЕУ.

Для нівелювання цього ефекту можливе використання способів короткострокового прогнозування швидкості та напрямку вітру. Одним із таких способів може бути застосування системи датчиків (анемометрів та флюгерів), які працюватимуть спільно з ВЕУ і дозволятимуть підлаштовуватися під параметри вітрового потоку в оптимальний проміжок часу.

Основним задумом є розташування навколо ВЕУ на певному радіусі датчиків швидкості та напрямку вітру, які будуть пов'язані між собою і самою ВЕУ й передаватимуть їй актуальні дані, що допоможе в управлінні кутом повороту самої ВЕУ та підлаштуванні найоптимальнішого кута атаки лопатей.

Радіальне розташування можна облаштувати на 8 або 16 румбів, щоб мінімізувати затрати на самі датчики та на мережу, що їх поєднує.



Кожен з датчиків передаватиме послідовні часові дані на центральний процесор управління, який враховує їх взаємне розташування, орієнтацію щодо основної установки, точну відстань до кожного з них та взаємозв'язки між даними.

Передусім контролер зчитує дані тим, з якого саме датчика вони отримані, робить їх ваговий внесок та на їх основі розраховує час, через який вітровий потік досягне точки розташування ВЕУ. При цьому враховується різниця швидкостей на висотах встановлення осі обертання ротора та встановлення датчиків (адже перепад між ними може бути значним, і швидкість вітрового потоку також). Це можна зробити, враховуючи вертикальний профіль вітру із застосуванням аналітичного виразу Лайхтмана або моделювання місцевості.

Важливим моментом є врахування помилкових даних, що спричиненні сторонніми факторами. Оскільки датчики є доволі чутливими, варто ввести перевірку на аномалії в даних і не враховувати такі дані у загальній вибірці.

За даними середньобагаторічних спостережень, в умовах України в місцевостях для встановлення ВЕУ переважають вітри зі середньорічними швидкостями 4-5 м/с. Вітри, при яких оголошується штормове попередження, мають швидкість 15−20 м/с. Тому, враховуючи сучасні можливості передачі інформації та необхідність затрат на обладнання для цієї передачі, а також швидкодію приводу контролю вітроагрегатів, оптимальна відстань розташування складових системи від ВЕУ − близько 500 м. Це дасть орієнтовно 100 с на реакцію в нормальному режимі роботи та орієнтовно 25 с при штормовому вітрі. Цього часу повинно бути цілком достатньо для зміни положення регулювальних механізмів.

Найважливішим етапом правильного підлаштування ВЕУ під значення вітрового потоку є розробка правильного алгоритму підлаштування. Для цього необхідне створення попередньої моделі такої установки та випробування її в лабораторних умовах для доведення можливості використання в повномасштабному розмірі для цілей енергозабезпечення.

Залежно від типу ВЕУ та індивідуальних умов встановлення на основі передбачених даних можливо буде інтегрувати під описаний метод такі закони керування:

- закон пропорційного керування;
- пропорційно-інтегрально-диференційне керування;
- оптимальний Pitch контроль;
- керування на основі коефіцієнта потужності (cos ϕ);
- закон керування на основі нечіткої логіки.

Також необхідною складовою системи є наявність акумулювальних елементів, які дозволять безперебійно працювати всій системі без прив'язки до виробітку енергії самої ВЕУ. Це може бути система з поєднанням інвертора та АКБ, або живлення безпосередньо від мережі, в яку генерує ВЕУ.

Розглянуте рішення не є надто дорогим порівняно з основними вузлами потужних вітроенергоустановок, а при використанні у вітропарках можливе матричне виконання самої системи для роботи на кілька установок, що ще більше знижує вартість системи й забезпечує взаємозв'язок між вітроагрегатами.

ПОСИЛАННЯ

1. Головко В. М. Вітроенергетика [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка, електромеханіка» / В. М. Головко ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/30536
2. Вітроенергетика. Курсовий проєкт [Електронний ресурс]: для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітньо-професійна програма «Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В. М. Головко, І. Я. Коваленко. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/54671
3. Теорія автоматичного керування: Ч. І [Електронний ресурс]: курс лекцій для студентів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» спеціальності «Електромеханічні системи автоматизації та електропривод» денної форми навчання / НТУУ «КПІ» ; уклад. М. Г. Попович, Б. І. Приймак. URL: https://ela.kpi.ua/handle/123456789/770

УДК 621.311.25

ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА ЧЕРКАСЬКОЇ ОБЛАСТІ: ВІТРОПОТЕНЦІАЛ ТА ЕКОЛОГІЧНІ ОБМЕЖЕННЯ ДІЯЛЬНОСТІ

М. Р. Лопушанська[1, 2], Л. В. Циганок[2], Ф. Ш. Абдуллаєв[3], Д. В. Завгородній[3]

[1]Товариство з обмеженою відповідальністю «ЕКО-ОПТІМА»,
82000, Старосамбірський р-н, Львівська обл., м. Старий Самбір, вул. Лева Галицького, 96а
mariialopushanska @gmail.com
[2]Асоціація професіоналів довкілля «PAEW», 03087, Київ-87 а/с 25
[3]Товариство з обмеженою відповідальністю «Атлас Глобал Енерджи»,
82655, Львівська область, Сколівський район, с. Опорець, вул. Шевченка, 112

Черкаська область має хороший потенціал у розвитку вітрової енергетики. Одним з важливих чинників під час проєктуванні об'єктів вітрової енергетики є врахування екологічних обмежень, які можуть унеможливити будівництво таких об'єктів. До екологічних обмежень слід віднести об'єкти природно-заповідного фонду, житлову забудову, оселища у межах об'єктів Смарагдової мережі, прибережно-захисні смуги водних об'єктів.

Ключові слова: *відновлювана енергетика, вітрова енергетика, відновлювані джерела енергії, швидкість вітру, екологічні обмеження, Черкаська область.*

WIND ENERGY IN CHERKASY REGION: WIND POTENTIAL AND ENVIRONMENTAL RESTRICTIONS

M. Lopushanska[1, 2] , L. Tsyganok[2], F. Abdullaiev[3], D. Zavhorodnii[3]

[1]ECO-OPTIMA Limited Liability Company,
96a, Lev Halytsky Street, Staryi Sambir, Lviv region, 82000, Staryi Sambir district, Lviv region
e-mail: mariialopushanska @gmail.com
[2]Professional Association Of Environmentalists Of The World (PAEW), 03087, Kyiv-87, PO Box 25
[3]Atlas Global Energy Limited Liability Company,
82655, Lviv region, Skole district, village of Oporets, 112 Shevchenko Street

Cherkasy region has good potential for wind energy development. One of the important factors in the design of wind energy objects is to take into account environmental restrictions that may make it impossible to build such objects. Environmental restrictions include nature reserves, residential areas, habitats within the Emerald Network, and coastal protection zones of water bodies..

Key words: *renewable energy, wind energy, renewable energy sources, wind speed, environmental restrictions, Cherkasy region.*

ORCID: [1] 0000-0002-0557-1609.

Черкаська область має хороший потенціал у розвитку вітрової енергетики. У межах Придніпровської височини середньорічна швидкість вітру на висоті 100 м становить від 6,5 м/с і вище [1]. Також високі показники характерні для Кременчуцького водосховища. Найнижчі показники середньорічної швидкості вітру зафіковані в межах Ірдино-Тясминської низовини (менше 6 м/с) (рис. 1).

Проте для реалізації проєктів з вітрової енергетики недостаньо хороших показників середньої швидкості вітру. Ще одним важливим чинником є врахування екологічних обмежень, які можуть унеможливити будівництво таких об'єктів. До екологічних обмежень слід віднести об'єкти природно-заповідного фонду, житлову забудову, оселища у межах об'єктів Смарагдової мережі, прибережно-захисні смуги водних об'єктів [2].

У межах Черкаської області області станом на 2025 рік налічується 601 об'єкт природно-заповідного фонду, загальною площею понад 70,6 тис. га. Серед великих територій та об'єктів природно-заповідного фонду Черкаської області – два національні природні парки «Нижньосульський» та «Білоозерський», Канівський природний заповідник, дендрологічний парк «Софіївка», Черкаський зоологічний парк, регіональний ландшафтний парк «Трахтемирів» [3].

До об’єктів Смарагдової мережі у межах Черкаської області належать: Кременчуцьке водосховище (SiteCode: UA0000110), Долина річки Рось (SiteCode: UA0000272), Долина річки Супій (SiteCode: UA0000302), Долина річки Золотоношка (SiteCode: UA0000329), Черкаський Бір (SiteCode: UA0000254), Нижньосульський НПП (SiteCode: UA0000082), Долина річки Кропивна (SiteCode: UA0000331), Холодний Яр (SiteCode: UA0000261), Шуляцьке болото (SiteCode: UA0000162). Також об’єкти Смарагдової мережі пропоновані до затвердження Постійним комітетом Бернської конвенції: Басейн річки Гірський Тікич (SiteCode: UA0000385), Територія між річками Серебрянка та Медіанка (SiteCode: UA0000567), Територія між річками Рось та Росава (SiteCode: UA0000561), Балки середньої частини річки Тясмин (SiteCode: UA0000568), Долина річки Ірклій (SiteCode: UA0000382) та Долина річки Бурімка (SiteCode: UA0000396) [4].

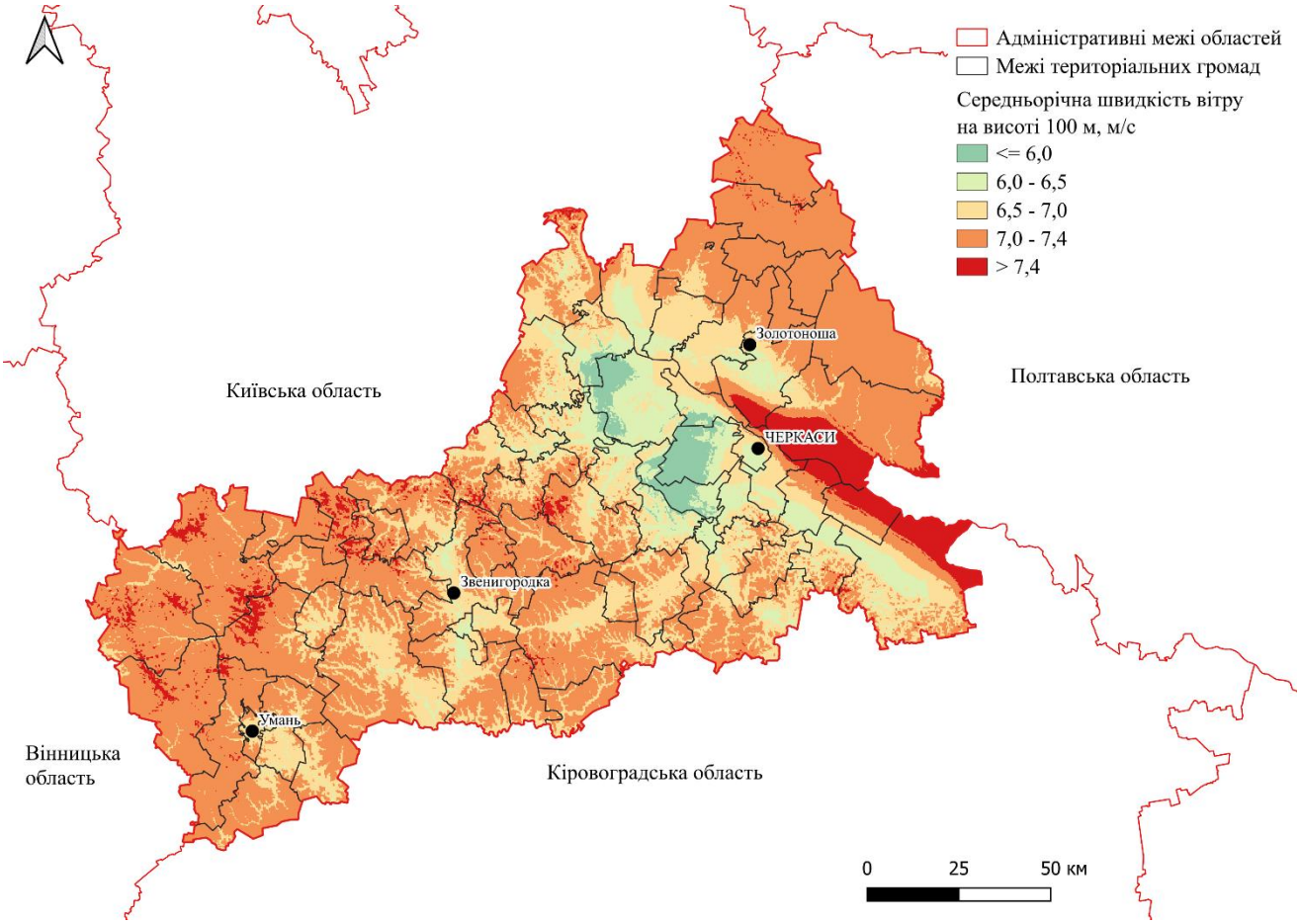


Рис. 1. Середньорічна швидкість вітру на висоті 100 м (складено за даними Global Wind Atlas [1])

Також при проєктуванні об’єктів вітрової енергетики слід враховувати відстань до житлоові забудови (рекомендовано не менше 700 м) та прибережно-захисні смуги водних об’єктів (25–200 м, залежності від водозбірної площі басейну річки та крутості схилів) [2].

ПОСИЛАННЯ

1. Global Wind Atlas URL: https://globalwindatlas.info/en/ (дата звернення: 02.03.2025).
2. Lopushanska M., Ivanov Ye., Bashynska Yu., Lopushanskyi O., Tsyganok L. Geoinformation modelling for the selection of wind energy project sites. International Conference of Young Professionals «GeoTerrace-2024» (October 7–9, 2024, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine). DOI: https://doi.org/10.3997/2214-4609.2024510051 (дата звернення: 02.03.2025).
3. Черкаська обласна державна адміністрація URL: https://ck-oda.gov.ua/eko-kategoriya/v-oblasti-stvorili-novi-zapovidniki/ (дата звернення: 02.03.2025).
4. Emerald Network - General Viewer URL: https://emerald.eea.europa.eu (дата звернення: 02.03.2025).

УДК 621.311.25

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ ВПЛИВУ НА ДОВКІЛЛЯ ДЛЯ ОБ'ЄКТІВ ВІТРОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ: НА ПРИКЛАДІ АВСТРАЛІЇ

М. Р. Лопушанська[1, 2, 5], Л. В. Циганок[2], Д. В. Завгородній[3], В. І. Данилишин[4], Н. В. Ревуцька[5], А. С. Доманський[6]

[1]Товариство з обмеженою відповідальністю «ЕКО-ОПТІМА»,
82000, Старосамбірський р-н, Львівська обл., м. Старий Самбір, вул. Лева Галицького, 96а
mariialopushanska@gmail.com
[2]Асоціація професіоналів довкілля «PAEW», 03087, Київ-87 а/с 25
[3]Товариство з обмеженою відповідальністю «Атлас Глобал Енерджи»,
82655, Львівська область, Сколівський район, с. Опорець, ву. Шевченка, 112
[4]ВСП «Техніко-економічний фаховий коледж НУ «Львівська політехніка», 79000, Львів, Львівська область, вул. Пасічна, 87
[5]ГО «Жіночий енергетичний клуб України» (WECU), 02000, м. Київ, вул. Воздвиженська, 14, корп. 2
[6]Товариство з обмеженою відповідальністю «ЮВА-Енерджі», 04123, м. Київ, вул. Світлицького, 35, оф. 1

Особливістю оцінки впливу на довкілля для об'єктів вітрової енергетики Австралії є нормативно-правове забезпечення для проведення ґрунтовних досліджень для оцінки впливу на флору та фауну, візуального впливу та комфорту, оцінки шуму та вібрації, а також впливу на здоров'я населення. Також чимало уваги приділяється оцінці кумулятивного впливу від реалізації таких проєктів.

Ключові слова: *відновлювана енергетика, вітрова енергетика, відновлювані джерела енергії, оцінка впливу на довкілля, вітрова електростанція, Австралія.*

PECULIARITIES OF ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT FOR WIND ENERGY PROJECTS: THE EXAMPLE OF AUSTRALIA

M. Lopushanska[1, 2, 5], L. Tsyganok[2], D. Zavhorodnii[3], V. Danylyshyn[4], N. Revutska[5], A. Domanskyy[6]

[1]ECO-OPTIMA Limited Liability Company,
96a, Lev Halytsky Street, Staryi Sambir, Lviv region, 82000, Staryi Sambir district, Lviv region
e-mail: mariialopushanska@gmail.com
[2]Professional Association Of Environmentalists Of The World (PAEW), 03087, Kyiv-87, PO Box 25
[3]Atlas Global Energy Limited Liability Company,
82655, Lviv region, Skole district, village of Oporets, 112 Shevchenko Street
[4]Technical and Economic College of Lviv Polytechnic National University, 87 Pasichna Street, Lviv, Lviv region, 79000
[5] NGO 'Women's Energy Club of Ukraine' (WECU) 02000, Kyiv, 14 Vozdvyzhenska str.
[6]Limited Liability Company 'YUVA-Energy', 35 Svitlytskoho Street, Budynok, office 1, 04123, Kyiv

A specific feature of environmental impact assessment for wind energy projects in Australia is the regulatory framework for conducting in-depth surveys to assess impacts on flora and fauna, visual impacts and amenity, noise and vibration, and public health impacts. Much attention is also paid to assessing the cumulative impact of such projects.

Key words: *renewable energy, wind energy, renewable energy sources, , environmental impact assessment, wind farm, Australia.*

ORCID: [1] 0000-0002-0557-1609.

Особливості оцінки впливу на довкілля для об'єктів вітрової енергетики розглянуто на прикладі вітрової електростанції «White Rock Wind Farm». Вітрова електростанція «White Rock Wind Farm» розташована в австралійському штаті Новий Південний Уельс. Уряд штату Новий Південний Уельс схвалив будівництво та експлуатацію до 119 вітрових турбін, а також поетапе будівництво проєкту. Перший етап проєкту складається з 70 турбін, які виробляють 175 МВт чистої відновлюваної електроенергії, якої достатньо для забезпечення електроенергією приблизно 105 000 будинків Нового Уельсу щорічно. Перший етап проєкту повністю введено в експлуатацію [1].

У першому звіті з ОВД, який був розроблений у 2012 році [2] охарактеризоване географічне положення об’єкта, загальний опис проєктних рішень щодо встановлення 119 вітрових установок, лінії електропередачі, під’їзні дороги, тимчасові споруди бетонного заводу, а також дані про незначну модернізацію місцевих доріг (в разі потреби). Реалізація проєкту дозволить зменшити викиди парникових газів приблизно на 754 000 т еквіваленту двоокису вуглецю (CO'e) на рік у межах системи Кунента і приблизно на 743 000 т CO2e, якщо буде запроваджено Схему скорочення викидів вуглекислого газу.

Вітрова електростанція згідно з законодавством Австралії належить до об’єктів критичної інфораструктури та підлягає обов’язковому проходженню процедури з ОВД.

Чимало уваги у звіті з ОВД приділяється впливу на флору та фауну, візуальному впливу та комфорту, оцінці шуму та вібрації, а також впливу на здоров’я населення.

Важливу увагу у звіті з ОВД приділено впливу на біорізноманіття, зокрема щодо дотримання Закону про природну рослинність (The Native Vegetation Act 2003) [3].

Зокрема, для кажанів оцінюється потенціал виникнення баротравм від реалізації проєкту. Для птахів оцінюється ймовірність зіткнення з вітровими турбінами, та можливість долання перешкод. Особлива увага приділяється оцінці кумулятивного впливу (бар’єрного ефекту для птахів та кажанів) від реалізації проєкту та вже існуючих вітрових парків. Зокрема, в межах оцінки впливу на біорізноманіття розглянуто масштаби впливу, проаталізовано кумулятивний вплив та запропоновано заходи мінімізації впливу на флопу та фауну.

Також у межах процедури з ОВД було детально оцінено візуальний вплив від ВЕС на навколишні житлові будинки.

У 2016 році було підготовлено звіт з оцінки впливу на довкілля для вітрової електростанції. У цьому звіті було детально оцінено потенційні впливи на довкілля для альтернативної лінії електропередачі та запропонованої підстанції. Здійснена оцінка впливу включала оцінку впливу на ландшафт та візуальний вплив, оцінку впливу будівельного та експлуатаційного шуму, оцінку впливу на біорізноманіття та оцінку компенсації, оцінку впливу на культурну спадщину корінних народів, а також дорожній рух і транспорт та управління ґрунтами й водними ресурсами.

У звіті з оцінки впливу на довкілля подано детальну інформацію про запропоновані зміни та відповідні землі, на які вони впливають; охарактеризовано детальну інформацію про контекст приєднання до мережі; проаналізовано законодавчі вимоги та консультації; оцінено екологічні проблеми та впливи, пов'язані з пропозицією; подано детальну інформацію про запропоновані заходи з пом'якшення наслідків; обґрунтувано запропоновані зміни; сформовано висновки й додатки, що містять відповідні експертні оцінки [4].

Отже, особливістю оцінки впливу на довкілля для об’єктів вітрової енергетики Австралії є нормативно-правове забезпечення для проведення ґрунтовних досліджень для оцінки впливу на флору та фауну, візуального впливу та комфорту, оцінки шуму та вібрації, а також впливу на здоров’я населення. Також чимало уваги придідяється оцінці кумулятивного впливу від реалізації таких проєктів.

ПОСИЛАННЯ

1. White Rock Wind Farm URL: https://whiterockwindfarm.com/ (дата звернення: 02.03.2025).
2. MAJOR PROJECT ASSESSMENT : White Rock Wind Farm (MP10_0160). URL: https://arkenergy.com.au/documents/396/DG%20Report%20Signed.pdf (дата звернення: 02.03.2025).
3. Native Vegetation Act 2003 No 103 URL: https://legislation.nsw.gov.au/view/whole/html/2014-01-01/act-2003-103 (дата звернення: 02.03.2025).
4. White Rock Wind Farm MP10_160 Modification Application No. 4 https://arkenergy.com.au/documents/528/01._White_Rock_Wind_Farm_MOD_4_-_EA_-_Main_Report.pdf (дата звернення: 02.03.2025).

УДК 621.314, 621.391

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ ЕЛЕМЕНТІВ БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

Д. Д. Овдій[1], В. М. Зварич[1] , О. М. Глазкова[2] , Л. Б. Остапчук[1]

[1]Інститут електродинаміки НАН України,
просп.Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com
[2]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
Вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна

Запропоновано розгляд прототипу елемента багаторівневої системи вібродіагностування вузлів вітрогенераторів.

Ключові слова: *вібродіагностика, елементи багаторівневої системи, лінійні випадкові процеси, процеси ARIMA.*

A FEATURES OF CONSTRUCTION OF ELEMENTS OF A MULTILEVEL SYSTEM VIBRATION DIAGNOSTICS OF WIND TURBINES

D. Ovdii[1], V. Zvaritch[1], O. Glazkova[2], L. Ostapchuk[1]

[1] Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteyskiy Ava., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com
[2] Institute of renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna St., Kyiv, Ukraine, 03143

The paper proposes to consider a prototype of an element of a multilevel system for vibration diagnostics of wind turbine components.

Key words: *vibration diagnostics, multilevel system elements, linear random processes, ARIMA processes.*

ORCID: [1]0000-0002-1271-4954; [2]0000-0001-9409-1975.

Використання систем діагностування при побудові та експлуатації вітрогенераторів різної потужності може суттєво підвищити надійність такого обладнання та економічні показники його використання. Для побудови ефективних систем діагностування необхідне створення математичних моделей інформаційних сигналів від діагностованих вузлів [1, 2]. На базі створених математичних моделей інформаційних сигналів діагностованих вузлів розробляють відповідні методи діагностування.

У доповіді розглядаються деякі особливості побудови першого рівня системи діагностування вітрогенераторів та стандарти, яким вони повинні відповідати. У своєму складі експериментальний зразок системи містить: вимірювальний давач (акселерометри), попередній підсилювач, прилад обробки вібраційних сигналів DAC. Обчислювальний модуль, побудований на основі мікрокомп'ютера Raspberry Pi відповідає за збір, обробку та аналіз даних, отриманих із плати оцифрування сигналу m-DAQ12. Raspberry Pi – це компактний і енергоефективний мікрокомп'ютер, який забезпечує виконання складних обчислювальних операцій у реальному часі та є центральним вузлом, що інтегрує всі вищезазначені компоненти системи. Завдяки компактним габаритам та низькому споживанню енергії мікрокомп'ютер Raspberry Pi є оптимальним вибором для інтеграції у вбудовані системи, де важливим є функціонування обчислювального модуля без надмірних енергетичних витрат. Крім того, Raspberry Pi забезпечує можливість зберігання даних про роботу системи задля їхнього подальшого аналізу.

Загалом даний мікрокомп'ютер виконує роль інтеграційного модуля, здатного ефективно справлятися з обробкою вібраційних сигналів та надавати необхідну інформацію для підтримки надійності вітрогенератора, забезпечуючи доступність і зручність у використанні в реальних умовах експлуатації.

Варто зазначити, що на Raspberry Pi Model B+ є можливість, наприклад, встановити власну ОС Raspberry Pi OS або інші подібні системи, розроблені на базі Linux. Однак усі вони безпосередньо не підтримують бібліотеку DLL, через її інтегрованість з Windows. Це саме стосується бібліотеки LBB для LabVIEW (хоча LabVIEW підтримує Linux, але тільки на архітектурі x86, а не на ARM, яка використовується на Raspberry Pi Model B+). Встановлення Windows на

Raspberry Pi Model B+ у теорії можливе через емулятор (наприклад Wine), який можна встановити на Raspberry Pi OS, але знову-таки той самий Wine підтримує застосунки тільки на архітектурі x86, а не ARM.

Тому доцільно в багаторівневій системі вібродіагностики технічного стану вітрогенераторів використати мікрокомп'ютери серії Raspberry Pi 4 Model B (та новіші). Вони надають можливість встановити повноцінну версію ОС Windows та отримати доступ до використання бібліотек DLL, LBB для LabVIEW, та іншого програмного забезпечення, що дозволить суттєво спростити роботу з системою та забезпечити її ефективне функціонування.

Важливим етапом розробки багаторівневої системи вібродіагностики вітрогенераторів є створення математичних моделей вібраційних сигналів. При побудові математичних моделей діагностичних сигналів використано принципово новий клас випадкових процесів, а саме клас лінійних випадкових процесів авторегресії. Суть такого підходу полягає в тому, що об'єкт, який діагностується, представляється у вигляді ядра лінійного процесу авторегресії, а сам процес задається різницевим рівнянням. На відміну від процесів, що використовуються на практиці, лінійні процеси авторегресії дають змогу описувати не тільки гаусові сигнали, але й сигнали, які мають безмежно-ділені закони розподілу, такі як гамма, пуассонівський, негативний біноміальний і також гаусів.

У доповіді також запропоновано використати як математичні моделі інформаційних сигналів моделі ARIMA. Авторегресійне інтегроване ковзне середнє, ARIMA (англ. autoregressive integrated moving average) – це модель статистичного аналізу, яка використовує часові ряди для кращого розуміння набору даних та прогнозування майбутніх тенденцій. Популярність ARIMA обумовлена її статистичними властивостями, а також використанням відомої методології Бокса – Дженкінса [3] у процесі побудови моделі. Крім того, різні моделі експоненціального згладжування можуть бути реалізовані за допомогою ARIMA моделей [4]. Ці моделі є особливо корисними для аналізу стаціонарних часових рядів, але також можуть бути застосовані до нестаціонарних даних після відповідної трансформації шляхом інтегрування. Процес моделювання передбачає кілька основних етапів: ідентифікація моделі, оцінка її параметрів та діагностика адекватності побудованої моделі.Особливістю моделей ARIMA є їхня статистична стійкість в порівнянні з ARMA моделями. Такі моделі можливо використати для прогнозування технічного стану енергетичних об'єктів різного типу [5]. Загалом модель ARIMA може відігравати важливу роль у побудові багаторівневої системи вібродіагностики вітрогенераторів завдяки своїй здатності аналізувати часові ряди вібраційних сигналів та прогнозувати їхні значення. Це дозволяє ідентифікувати відхилення від нормального функціонування вузлів, що є важливим для своєчасного виявлення збоїв та можливих несправностей у системі. Також ARIMA здатна ефективно згладжувати сигнали та відфільтровувати шуми, забезпечуючи точніший аналіз отриманих даних. Завдяки своїй адаптивності модель може бути інтегрована в обчислювальний модуль на базі мікрокомп'ютера Raspberry Pi, що дозволить автоматизувати процес діагностики вітрогенераторів, здійснити їхнє обслуговування на основі прогнозування потенційних несправностей та забезпечити більшу мобільність системи. Таким чином, для аналізу та прогнозування вібраційних сигналів, застосування ARIMA в системі діагностування вітрогенераторів сигналів може сприяти підвищенню надійності роботи системи, зниженню витрат на обслуговування та оптимізації експлуатаційних процесів.

Роботу виконано в рамках проекту НФДУ 2023.04/0022 «Розроблення апаратно-програмного комплексу та методики оперативного виявлення пошкоджень системи тепло- та водопостачання з врахуванням їх зношеності та мілітарних впливів»

ПОСИЛАННЯ

1. Зварич В. М., Глазкова О. М. Дослідження можливостей використання ядер лінійних AR та ARMA процесів якості діагностичних ознак технічного стану обертових вузлів генераторів вітроустановок. Відновлювана енергетика. 2022 № 1. С. 1–7. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).66-72

2. Babak V. P., Babak S. V., Myslovych M. V., Zaporozhets A. O., Zvaritch V. M. Diagnostic Systems for Energy Equipments Part of the Studies in Systems, Decision and Control book series (SSDC, volume 281). Erfurt: Springer Nature, (Switzerland), 2020. 133 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3

3. Box G.E.P., Jenkins G., Time Series Analysis, Forecasting and Control, Holden-Day, San Francisco, CA, 1970. https://www.researchgate.net/publication/299459188_Time_Series_Analysis_Forecasting_and_Control5th_Edition_by_George_E_P_Box_Gwilym_M_Jenkins_Gregory_C_Reinsel_and_Greta_M_Ljung_2015_Published_by_John_Wiley_and_Sons_Inc_Hoboken_New_Jersey_pp_712_ISBN_

4. McKenzie E. D., General exponential smoothing and the equivalent ARMA process, J. Forecasting 3 (1984) 333–344. https://www.academia.edu/20827863/General_exponential_smoothing_and_the_equivalent_arma_process

5. Zendehboudi A., Baseer M. A., Saidur R., Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: A review. Journal of Clean Production. Vol. 199, (2018), hh. 272–285. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.164

УДК 621.311.25

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ ДЛЯ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

О. В. Кулєш[1], В. М. Зварич[1]

[1]Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com

Запропоновано розгляд можливості використання нейронних мереж для вібродіагностики вітрогенераторів.

Ключові слова: *вітрогенератор, вібродіагностика, нейронна мережа*

SOME FEATURES OF USING NEURAL NETWORKS FOR VIBRATION DIAGNOSTICS OF WIND TURBINE

O. Kulesh[1], V. Zvaritch[1]

[1] Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteyskiy Ava., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com

It is proposed to consider the possibility of using neural networks for vibration diagnostics of wind generators.

Key words: *wind turbine, vibration diagnostics, neural network .*

ORCID: [1]0000-0002-1271-4954

Вітроенергетика відіграє провідну роль у розвитку новітньої енергетики. Особливо важливе значення вона матиме в повоєнний період. Збільшення продуктивності вітроенергетики, а також зниження тарифу електроенергії, що виробляється вітрогнераторами, безумовно пов'язана з надійністю таких систем. Тому впровадження та використання систем діагностування при побудові та експлуатації вітрогенераторів відіграє значну роль у підвищенні економічних показників використання такого обладнання. Для побудови ефективних систем діагностування необхідне створення й використання новітніх алгоритмів діагностики [1–3].

Рис. 1. Точки кріплення акселерометрів системи вібродіагностики Брюль і К'єр

У цій доповіді для визначення технічного стану вітрогенераторів використано нейронні мережі. У задачах вітроенергетики такі моделі, зокрема, використовуються для оцінки та прогнозування швидкості вітру.

На рис. 1 показано точки кріплення акселерометрів системи вібраційного моніторингу вітротурбін (Vibro Vind Monitoring System), розробленій Брюль і К'єр (Brüel & Kjær). Система установлена на вітрогенераторах Gamesa, Vestas, GE, Repower. Така система взята за основу побудови нейронної мережі, яка показана на рис. 2.

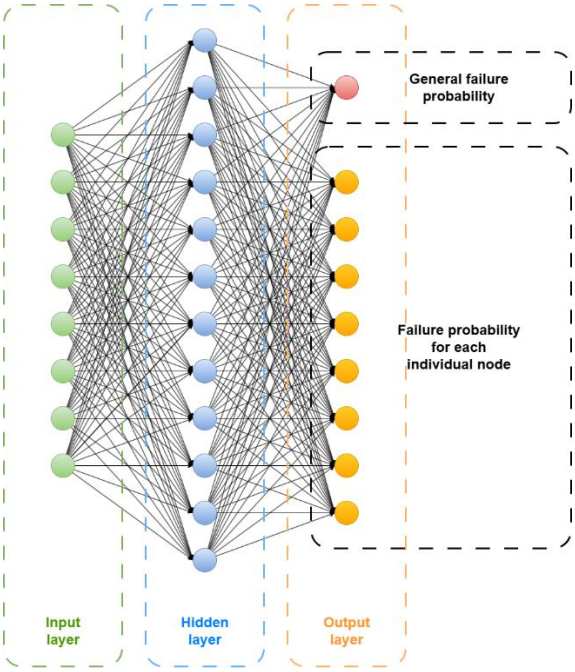


Рис. 2. Нейронна мережа

У роботі розглянуто можливість використання нейронних мереж для вібраційної діагностики вітрогенераторів як перспективного напряму розвитку систем моніторингу стану енергетичного обладнання. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність виявлення дефектів і попередження відмов елементів електротехнічного обладнання за рахунок використання методів машинного навчання.

Впровадження систем вібродіагностики на основі нейронних мереж дозволяє своєчасно виявляти та прогнозувати можливі несправності, що сприяє підвищенню надійності та ефективності роботи вітрогенераторів. Це своєю чергою забезпечує зниження витрат на технічне обслуговування, підвищує безпеку експлуатації та збільшує термін служби вітроенергетичного обладнання.

Подальші дослідження в цій сфері можуть бути спрямовані на оптимізацію архітектури нейронних мереж, покращення алгоритмів обробки вібраційних сигналів та їх адаптацію до умов експлуатації конкретних типів вітрогенераторів. Таким чином, застосування методів машинного навчання та нейронних мереж у вібродіагностиці вітротурбін відкриває широкі перспективи для підвищення ефективності їхньої роботи, зниження експлуатаційних витрат та подовження строку служби ключових компонентів.

Роботу виконано в межах проєкту НФДУ 2023.04/0022 «Розроблення апаратно-програмного комплексу та методики оперативного виявлення пошкоджень системи тепло- та водопостачання з урахуванням їх зношеності та мілітарних впливів».

ПОСИЛАННЯ

1. Зварич В. М., Глазкова О. М. Дослідження можливостей використання ядер лінійних AR та ARMA процесів якості діагностичних ознак технічного стану обертових вузлів генераторів вітроустановок. Відновлювана енергетика. 2022. № 1. С. 1–7. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).66-72
2. Babak V. P., Babak S. V., Myslovych M. V., Zaporozhets A. O., Zvaritch V. M. Diagnostic Systems for Energy Equipments Part of the Studies in Systems, Decision and Control book series (SSDC, volume 281). Erfurt: Springer Nature (Switzerland), 2020. 133 p. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3
3. Avendano-Valencia L. D., Fassois S. D. Stationary and non-stationary random vibration modelling and analysis for an operation wind turbine. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, vol. 47, hh. 263–285. https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2013.07.022

УДК 517.9; 519.6; 533.6; 629.734

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВЕРТИКАЛЬНО-ОСЬОВОГО ВІТРОДВИГУНА В ПОТОЦІ В'ЯЗКОГО ГАЗУ

Ю. О. Крашаниця

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
вул. Вадима Манька, 17, м. Харків, 61070, Україна,
тел.: (067) 573-36-79, e-mail: u.krashanitsa@khai.edu

На основі узагальненого та поширеного апарату векторно-тензорного аналізу побудовано алгоритмічні основи числової реалізації методу граничних інтегральних рівнянь у задачах динамічної взаємодії реального потоку в'язкого газу з багатолопатевим вертикально-осьовим вітродвигуном. Визначення розподілених характеристик, як-от поверхневі тертя і тиск, просторове розповсюдження вихрових структур, принципово впливають на міцності та аеродинамічні характеристики в процесі проєктування такого об'єкта відновлювальної енергетики, а в кінцевому результаті – на його економічну доцільність та привабливість.

Ключові слова: *вертикально-осьовий вітродвигун, метод граничних інтегральних рівнянь, розподілені та сумарні аерогазодинамічні характеристики.*

MATHEMATICAL MODEL OF A VERTICAL-AXIAL WIND MOTOR IN A VISCOUS GAS FLOW

Yu. Krashanytsya

National aerospace University named after M. E. Zhukovsky
17, Vadym Manko str., Kharkov, Ukraine, 61070
phone: (067) 573-36-79, e-mail: u.krashanitsa@khal.edu

Based on the generalized and widespread apparatus of vector-tensor analysis, algorithmic foundations for numerical implementation of the method of boundary integral equations in problems of dynamic interaction of a real viscous gas flow with a multi-bladed vertical axis wind turbine are built. Determination of distributed characteristics such as surface friction and pressure, spatial distribution of vortex structures fundamentally affect the strength and aerodynamic characteristics in the process of designing such a renewable energy facility, and in the final result - on its economic feasibility and attractiveness.

Keywords*: vertical axis wind turbine, method of boundary integral equations, distributed total aero-gas-dynamic characteristics.*

ORCID: 0000-0000-0000-0000

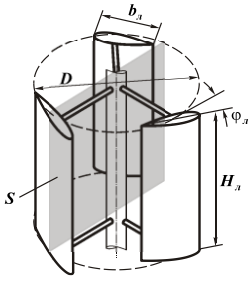


Рис. 1. Трилопатева вітротурбіна

Найпоширеніші на сьогодні ВЕУ з горизонтальною віссю обертання вітродвигуна поки що не можуть перевищити за потужністю 5–7 Мвт, що своєю чергою обмежує можливості зниження вартості кіловат-години до конкурентоспроможної величини. Водночас потужність ВЕУ з вертикальною віссю обертання (ВВВ) вітроротора (типу ротора Дар'є, але з прямими лопатями) (рис. 1) може досягати, за оцінками експертів, 10–30 Мвт. Можна перерахувати такі переваги цих вітроустановок, як незалежність функціонування від напрямку дії вітрового потоку, можливість переходу від консольного кріплення осі вітроротора до двоопорного, можливість розміщення споживача енергії (електрогенератор, насос) в основі вітроустановки (знижуються вимоги до висоти, міцності та жорсткості опори), конструкції лопатей та зниження їх матеріаломісткості (а отже, й вартості), зменшення шумності ВЕУ та площі земельної ділянки для її розміщення тощо.

На основі узагальненого та поширеного апарату векторно-тензорного аналізу побудовано алгоритмічні основи числової реалізації методу граничних інтегральних рівнянь у задачах динамічної взаємодії реального потоку в'язкого газу з багатолопатевим вертикально-осьовим вітродвигуном (рис. 1). Визначення розподілених характеристик, як-от поверхневі тертя й тиск, просторове розповсюдження вихрових структур, принципово впливають на міцності та аеродинамічні характеристики в процесі проєктування такого об'єкта відновлювальної енергетики, а в кінцевому результаті – на його економічну доцільність та привабливість.

Найбільш досконалою та апробованою математичною моделлю механіки рідин та газів є відома консервативна система диференціальних рівнянь у частинних похідних Нав'є – Стокса [1]:

$$(\nabla,\mathbf{A})=0;\ \mathbf{A}=\begin{cases}\rho\mathbf{V},\\ \boldsymbol{\Omega}=\begin{cases}[\nabla,\mathbf{V}];\\ \mathbf{k}\left(\dfrac{\partial v}{\partial x}-\dfrac{\partial u}{\partial y}\right);\end{cases}\\ \mathbf{E};\\ \boldsymbol{\Pi},\end{cases} \tag{1}$$

де, звичайно, ρ — щільність середовища, вектори швидкості **V**, завихорності **Ω** та повної енергії **E**, а **Π** – тензор імпульсу:

$$\boldsymbol{\Pi}=\rho\mathbf{V}\mathbf{V}+\mathbf{I}\left\{p+\frac{2}{3}\frac{\mu}{Re}(\nabla,\mathbf{V})\right\}-2\frac{\mu}{Re}\nabla^{*}\mathbf{V}+\frac{\mu}{Re}[\mathbf{I},\boldsymbol{\Omega}]=\big[\nabla,[\mathbf{I},\boldsymbol{\Psi}]\big], \tag{2}$$

консервативність якого забезпечує існування потенціалу **Ψ** з доведеними [2] властивостями:

$$[\nabla,\boldsymbol{\Psi}]=0;\quad \big[\nabla,[\nabla,\boldsymbol{\Psi}]\big]=0\,. \tag{3}$$

Фундаментальні розв'язки **Γ** [2] консервативних рівнянь (1)

$$\begin{aligned}&R^3:\boldsymbol{\Gamma}(x,y,z)=\mathbf{I}\varphi-[\mathbf{I},\mathbf{G}],\ (\nabla,\boldsymbol{\Gamma})=\nabla\varphi-[\nabla,\mathbf{G}]=0;\\ &R^2:\boldsymbol{\Gamma}(x,y)=\mathbf{I}\varphi-[\mathbf{I},\mathbf{k}\psi],\ (\nabla,\boldsymbol{\Gamma})=0\Leftrightarrow\nabla\varphi=[\nabla,\mathbf{k}\psi]=0,\end{aligned} \tag{4}$$

де φ, ψ — гармонічні функції – розв'язки рівняння Лапласа, вектор $\mathbf{G}=\dfrac{z-z_0}{r}\nabla arctg\dfrac{y-y_0}{x-x_0}=cos\theta\nabla\phi$, такий, що за визначенням $[\nabla,\mathbf{G}]=\nabla\varphi$; а також $(\nabla,\mathbf{G})=0$, приводять до можливостей побудови інтегральних представлень системи рівнянь (1) щодо векторів **V**, **Ω**, **E**, **Π**:

$$\mathbf{V}=\oint_{(L)}\left\{\frac{Re}{2\mu}(\mathbf{n},\boldsymbol{\Gamma})p+\frac{1}{2}\big([\mathbf{n},\boldsymbol{\Omega}],\boldsymbol{\Gamma}\big)+\frac{Re}{2\mu}\left(\mathbf{s}\Psi_n-\mathbf{n}\Psi_s\right)-\frac{Re}{\mu}\left([\mathbf{k},\boldsymbol{\Psi}]\frac{\partial\varphi}{\partial s}-\boldsymbol{\Psi}\frac{\partial\psi}{\partial s}\right)+[\boldsymbol{\kappa},\mathbf{V}]\frac{\partial\varphi}{\partial s}-\mathbf{V}\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right\}dl; \tag{5}$$

$$\omega=2\oint_{(L)}\left\{\frac{Re}{2\mu}\frac{\partial\varphi}{\partial s}p+\frac{Re}{2\mu}\left(\boldsymbol{\Psi},\frac{\partial\nabla\varphi}{\partial s}\right)+\left(\mathbf{V},\frac{\partial\nabla\varphi}{\partial s}\right)-\frac{\omega}{2}\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right\}dl; \tag{6}$$

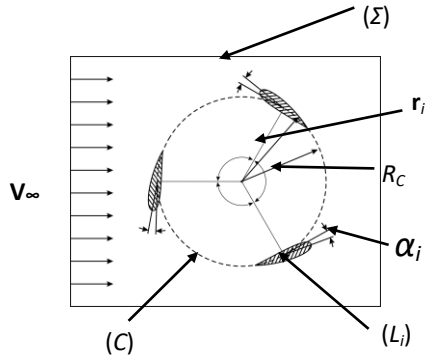


Рис. 2. Плоский переріз трилопатевої вітротурбіни

$$\boldsymbol{\Pi}=\oint_{(L)}\left\{[\boldsymbol{\Pi},\mathbf{k}]\frac{\partial\varphi}{\partial s}+[\boldsymbol{\Psi},\mathbf{k}]\frac{\partial\nabla\varphi}{\partial s}+\boldsymbol{\Psi}\frac{\partial\nabla\psi}{\partial s}-\frac{[\mathbf{n},\mathbf{k}]}{2}p\nabla\psi-\boldsymbol{\Pi}\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right\}dl, \tag{7}$$

$$\mathbf{E}=\oint_{(L)}\left\{\Big(\big(\mathbf{n},\nabla^{*}\mathbf{E}\big),\boldsymbol{\Gamma}\Big)+[\mathbf{E},\mathbf{k}]\frac{\partial\varphi}{\partial s}-\mathbf{E}\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right\}dl,\ \big(\mathbf{n},\nabla^{*}\mathbf{E}\big)=n_i\nabla E_i\,, \tag{8}$$

а також узагальненого потенціалу **Ψ**, як розв'язку рівняння з (3).

$$\boldsymbol{\Psi}=\oint_{(L)}\left\{\big((\mathbf{n},\boldsymbol{\Pi}),\boldsymbol{\Gamma}\big)-[\mathbf{k},\boldsymbol{\Psi}]\frac{\partial\psi}{\partial s}-\boldsymbol{\Psi}\frac{\partial\varphi}{\partial n}\right\}dl. \tag{9}$$

Однозначна розв'язуваність системи граничних інтегральних рівнянь, одержаних відповідними граничними переходами з інтегральних представлень (5–9), дозволяє одержувати не тільки поверхневий розподіл тиску й тертя, а й сумарні аеродинамічні характеристики, як-от підіймальна сила та сила опору, впливати на їх формування за рахунок змін конструктивних параметрів (форма лопаті, кількість лопатей, розташування, багатоярусність), відстежувати розповсюдження вихрових структур та їхню взаємодію з лопатями двигуна (рис. 2).

ПОСИЛАННЯ

1. Lemarie, P. G. The Navier–Stokes problem in the 21st century. CRC Press. Taylor&Francis Group, 2016. 718 p.

2. Крашаниця, Ю. О. Векторно-тензорний аналіз, теорія потенціалу та метод граничних інтегральних рівнянь у початково-крайових задачах аерогідродинаміки. К.: Наук. думка, 2016. 273 с.

УДК 621.548

ДИНАМІЧНІ НАВАНТАЖЕННЯ В ЛОПАТЯХ РОТОРА ДАР'Є

В. В. Коханєвич

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 50
тел./факс 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Проведено аналіз навантажень у лопатях ротора Дар'є та визначено, що вони мають циклічний характер залежно від обертів ротора.

Ключові слова: *вітроенергетика, вітроустановка, ротор Дар'є.*

DYNAMIC LOADS IN THE DARRIEUS ROTOR BLADES

V. Kokhanievich

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
03143, Kyiv, Metrologicalhna St., 50
tel./fax 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

An analysis of the loads in the blades of the Darrieus rotor has been conducted and it has been determined that they are cyclic in nature and depends on the rotor speed.

Keywords: win*d energy, wind turbine, Darrieus rotor.*

ORCID: 0009-0009-0461-4388

Розробники вітроустановок часто використовують у своїх конструкціях ротор, що був запропонований в 1931 році французьким авіаконструктором Жоржем Дар'є. Цей ротор принаджує розробників своєю простотою та відсутністю потреби в механізмах орієнтації за напрямком повітряного потоку. Але, як показує досвід, у процесі їх експлуатації руйнуються лопаті, місця кріплення лопаті, опорні підшипники.

Для виявлення причини вищезгаданих руйнувань розглянемо принципову схему роботи ротора Дар'є, що наведена на рис. 1.

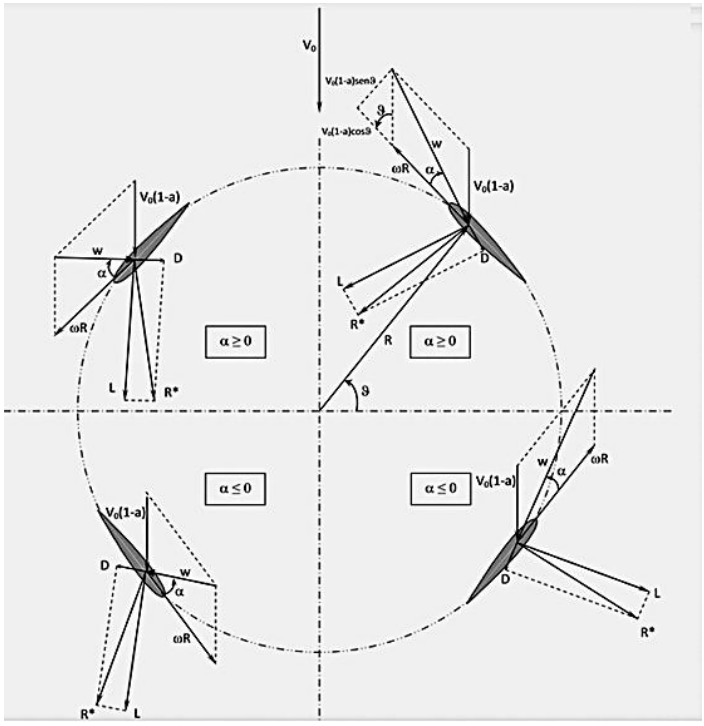
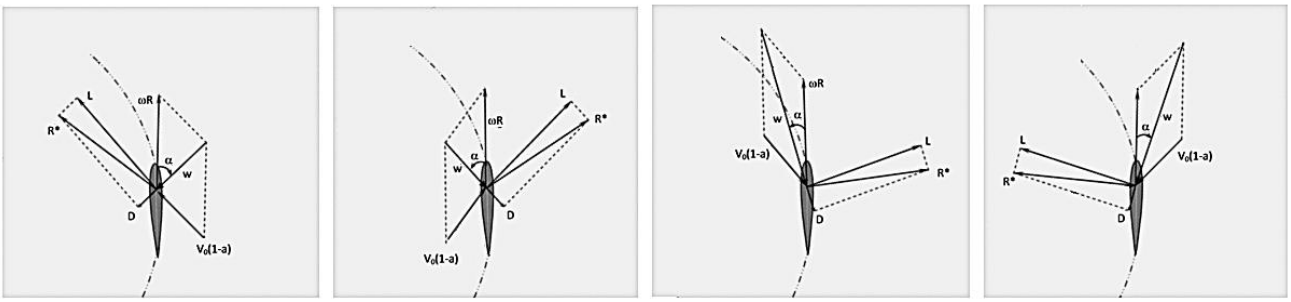


Рис. 1. Принцип дії ротора Дар'є

Основна маса публікацій щодо ротора Дар'є присвячена аеродинамічним властивостям цього типу роторів, оптимізації геометричних параметрів ротора, моделюванню обтікання повітряним потоком лопаті тощо [1–3]. Виходячи з рис. 1 розглянемо, як змінюється навантаження на лопать у процесі її обертання, тобто дію на неї підйомної сили R^*, що показано на рис. 2.



a) b) c) d)

Рис. 2. План сил що діють на лопать ротора Дар'є

Якщо рис. 2, a прийняти за точку відліку, то вже на рис. 2, b та 2, c (тобто на 90° та 180°) підйомна сила діє з протилежного боку профілю лопаті, а на рис. 4, d (270°) видно, що підйомна сила знову переходить на протилежний бік профілю. Оскільки вздовж хорди лопаті її жорсткість в декілька разів більше ніж упоперек, то побудуємо графік дії підйомної сили впоперек хорди лопаті R_X^*, що, відповідно, показано на рис. 3.

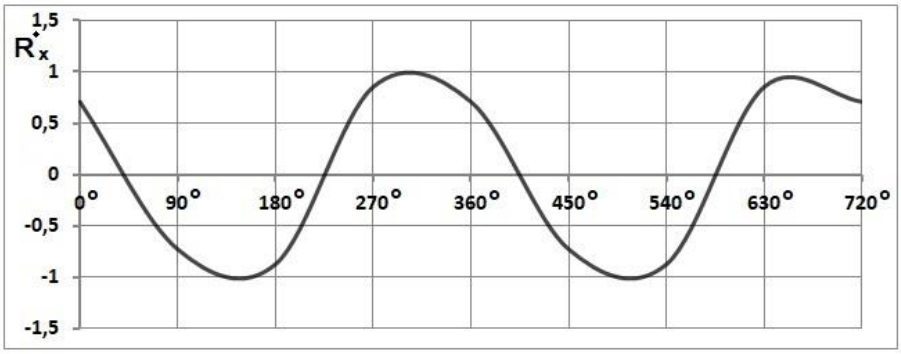


Рис. 3. Графік *зміни сили, що діє впоперек лопаті, при її обертанні*

ВИСНОВОК

У процесі обертання ротора Дар'є підйомна сила змінює як свою величину, і напрямок, що призводить до знакоперемінних поперечних навантажень, наближених до синусоїдальної форми, які залежать від обертів ротора, і є причиною руйнування елементів вітроустановки з ротором Дар'є.

ПОСИЛАННЯ

1. Brochier G., Fraunier P., Beguier C., and Paraschivoiu I., 1986, "Water Channel Experiments of Dynamic Stall on Darrieus Wind Turbine Blades," Journal of Propulsion and Power. Vol. 2. No. 9. Pp. 445–449.
2. Faris Alqurashi, M. H. Mohamed. Aerodynamic Forces Affecting the H-Rotor Darrieus Wind Turbine. Modelling and Simulation in Engineering. 11 January 2020 https://doi.org/10.1155/2020/1368369.
3. B. Zouzou, I. Dobrev, F. Massouh, R. Dizene. Experimental and numerical analysis of a novel Darrieus rotor with variable pitch mechanism at low TSR. Energy. Volume 186, 1 November 2019, 115832.

ПАРАЛЕЛЬНА РОБОТА АВТОНОМНИХ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З АСИНХРОННИМИ ГЕНЕРАТОРАМИ

***В. М. Головко*[1], *І. В. Косточка*[2]**

[1, 2] Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, Україна, 03056.
тел.: (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

У роботі досліджено умови ефективної паралельної роботи автономних вітроенергетичних установок з асинхронними генераторами. Розглянуто сучасні методи керування, оптимізації та компенсації реактивної потужності, що сприяють підвищенню стабільності та якості електропостачання в автономних системах.

Ключові слова: *автономна установка, паралельна робота, вітроенергетична установка, асинхронний генератор.*

ORCID: [1]10000-0003-0195-9654; [2]0009-0009-0146-7335.

Актуальність дослідження

У контексті децентралізації енергопостачання постає необхідність розробки автономних систем енергозабезпечення, зокрема на основі паралельно працюючих вітроенергетичних установок. Проте такі системи стикаються з необхідністю визначення умов, за яких досягається надійне енергозабезпечення споживача, а ефективність та стійкість таких систем обмежена специфікою асинхронних генераторів. Використання вітроенергетичних установок на основі асинхронних генераторів може стати економічно доступним рішенням для приватних домогосподарств та інших споживачів.

Мета дослідження

Провести порівняльний аналіз паралельної роботи автономних вітроенергетичних установок з асинхронними генераторами за результатами досвіду застосування цих систем.

Основні матеріали досліджень

Паралельна робота автономних вітроенергетичних установок з асинхронними генераторами (АВЕУ з АГ) потребує вирішення кількох ключових задач: забезпечення стійкості частоти й напруги в мережі, мінімізація впливу коливань швидкості вітру на роботу системи та ефективна компенсація реактивної потужності.

Сучасні дослідження демонструють різні підходи до вирішення цих задач. Один з них — застосування адаптивних методів керування частотою та напругою в системі, що дозволяє підвищити стійкість роботи ВЕУ в умовах змінного вітрового навантаження. Використання динамічних алгоритмів керування дозволяє компенсувати миттєві зміни навантаження та мінімізувати втрати енергії. Особливо перспективним є застосування нейромережевих підходів та методів машинного навчання для прогнозування вітрових навантажень і коригування параметрів роботи системи в режимі реального часу.

Значна увага приділяється інтеграції систем накопичення енергії, таких як акумуляторні батареї, суперконденсатори та гібридні системи накопичення. Вони допомагають згладжувати коливання потужності, забезпечуючи стабільне енергопостачання. Останні дослідження показують, що поєднання літій-іонних акумуляторів з надпровідниковими магнітними накопичувачами дозволяє досягти більшої ефективності та швидкості реакції на зміну вітрового навантаження.

Важливим аспектом є компенсація реактивної потужності, що може значно покращити енергетичну ефективність автономних ВЕУ. Сучасні дослідження вказують на ефективність застосування конденсаторних батарей, пристроїв типу STATCOM (статичні синхронні компенсатори) та FACTS (гнучкі системи передачі змінного струму), які здатні підтримувати необхідний рівень напруги та покращувати стабільність електричної мережі. Високоефективні методи управління на основі фазово-керованих реакторів (TCR) також демонструють позитивний вплив на якість електроенергії в автономних системах.

Перспективним напрямом є використання методів оптимізації роботи асинхронних генераторів, що дозволяє знизити рівень гармонік у мережі, покращити показники якості електроенергії та підвищити загальну ефективність системи автономного електропостачання. Дослідження показують, що застосування генетичних алгоритмів та методів рою частинок для оптимізації роботи ВЕУ може значно підвищити їхню продуктивність та довговічність. Останні

роботи з використанням цифрових двійників ВЕУ дозволяють точніше прогнозувати роботу установок та здійснювати їхню віддалену оптимізацію.

Новітні підходи передбачають комплексне поєднання адаптивних систем керування, передових алгоритмів оптимізації та використання розподілених систем зберігання енергії. Зокрема, дослідження показують ефективність інтеграції штучного інтелекту для автоматичного регулювання роботи ВЕУ відповідно до змінних умов навколишнього середовища. Також впровадження смарт-мереж з можливістю дистанційного моніторингу та управління дозволяє значно підвищити стабільність автономних систем електропостачання.

Сучасні підходи до керування, оптимізації та інтеграції накопичувачів енергії є ключовими для забезпечення ефективної та стабільної роботи автономних ВЕУ з асинхронними генераторами. Подальші дослідження мають бути спрямовані на розробку комплексних методик управління та підвищення адаптивності таких систем до змінних умов експлуатації.

Висновок

Системи енергозабезпечення на основі паралельно працюючих АВЕУ з АГ є перспективним напрямом розвитку децентралізованої енергетики. Основними викликами залишаються забезпечення стабільності параметрів електроенергії та підвищення стійкості системи до зовнішніх впливів. Використання сучасних алгоритмів керування та систем накопичення енергії може значно підвищити ефективність роботи таких установок.

УДК 621.548

РОБОТА ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З ІМПУЛЬСНИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

В. В. Коханєвич

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 50
тел./факс 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Запропоновано критерії для узгодження роботи вітроелектричної установками з імпульсним перетворювачем електричної енергії.

Ключові слова: *вітроенергетика, вітроелектрична установка, імпульсний перетворювач електричної енергії.*

OPERATION OF A WIND POWER PLANT WITH A PULSE CONVERTER

V. Kokhanievich

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
03143, Kyiv, Metrologicalhna St., 50
tel./fax 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Criteria are proposed for coordinating the operation of wind power plants with a pulsed electric energy converter.

Keywords: *wind energy, wind power plant, pulsed electric energy converter.*

ORCID: 0009-0009-0461-4388

Однією з важливих складових частин вітроелектричної установки (ВЕУ) є електричний генератор. У процесі розвитку галузі вітроенергетики розробники використовували різноманітні типи генераторів: постійного струму, синхронні та асинхронні. У цей час основний тип генераторів, які використовуються в ВЕУ, особливо в установках малої та середньої потужності, – це синхронні машини зі збудженням від постійних магнітів. При цьому необхідно зауважити, що характеристика ротора та характеристика синхронного генератора не узгоджуються. Так, потужність ротора має кубічну залежність від швидкохідності або обертів, а потужність генератора лінійна від обертів. Одним зі шляхів узгодження характеристик ротора є використання імпульсного струму для роботи з різного роду навантаженнями (нагрівачами, електрохімічними акумуляторами, електролізерами тощо) [1, 2]. Тобто перемінні за величиною й частотою струм і напруга випрямляються і поступають на пристрій, який формує імпульси постійної величини за напругою. У разі використання частотно-імпульсного модулятора (ЧІМ) частота імпульсів пропорційна напрузі, а в разі використання широтно-імпульсного модулятора ширина імпульсу пропорційна напрузі. У цій роботі розглянемо роботу ВЕУ з частотно-імпульсним модулятором.

Традиційно для аналізу та узгодження цей спосіб у нашому випадку неможливо, оскільки відсутня характеристика моменту генератора від обертів при його роботі з імпульсним навантаженням. Тому в цьому разі використаємо баланс енергій. Енергія ротора ВЕУ при швидкості вітру v_1 (рис. 1) [3] за проміжок часу t становитиме:

$$E_P = C_P \cdot \rho \cdot \frac{v_1^3}{2} \cdot S \cdot t \,, \tag{1}$$

де C_P – коефіцієнт використання енергії повітряного потоку; v_1 – швидкість вітру, що відповідає початку роботи ВЕУ; S – площа обмаху ротора; ρ – густина повітря.

Відповідно, енергія, яку буде генерувати імпульсний пристрій за цей же проміжок часу t, становитиме:

$$E_I = C \cdot \frac{U^2}{2} \cdot f_I \cdot t \,, \tag{2}$$

де C – ємність конденсатора імпульсного пристрою; U – робоча напруга пристрою навантаження (напруга заряджання акумуляторів, електролізера тощо); f_I – частота імпульсів.

Оскільки бажано, щоб енергія імпульсного пристрою не перевищувала енергію ротора, то, прирівнявши вирази (1) та (2), отримаємо:

$$C \cdot U^2 \cdot f_I \le C_p \cdot \rho \cdot v_1^3 \cdot S \,. \tag{3}$$

Рівняння (3) дозволяє визначити окремі параметри імпульсного пристрою, але не є достатнім.

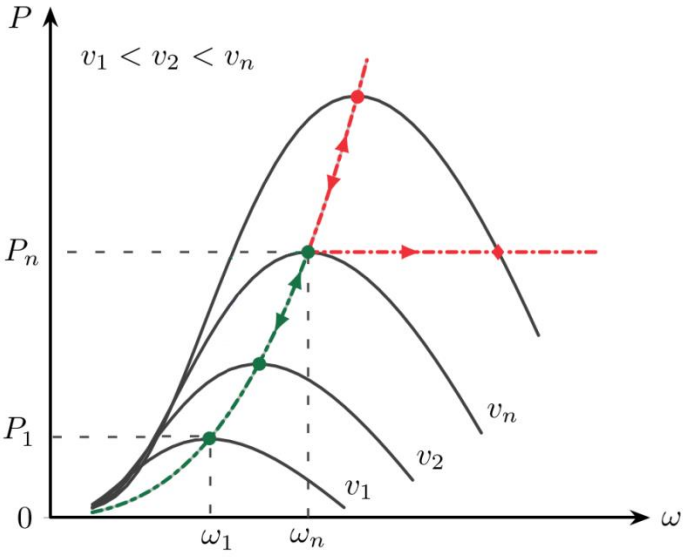


Рис. 1. Характеристики ротора ВЕУ

Розглянемо роботу нашої системи, коли ротор виходить на номінальні оберти ω_n та номінальну потужність P_n і починається процес регулювання, тобто далі при збільшенні швидкості вітру потужність не збільшується. При цьому режимі імпульсний струм *I* практично може стати постійним і рівняння балансу можна записати в такому вигляді:

$$C \cdot \frac{U^2}{2} \cdot f_I \cdot t \le U \cdot I \cdot t = \frac{U^2}{R} \cdot t \,, \tag{4}$$

де *R* – опір навантаження.

Після перетворення отримаємо другу умову для визначення параметрів імпульсного пристрою:

$$\frac{C}{2} \cdot f_I \le \frac{1}{R} \,. \tag{5}$$

ВИСНОВОК

Отримані рівняння (3) та (5) дозволяють визначити параметри імпульсного пристрою для узгодження його роботи з ротором вітроелектричної установки та синхронним генератором зі збудженням від постійних магнітів.

ПОСИЛАННЯ

1. Головко В. М., Коханєвич В. П., Шихайлов М. О., Сандовал К. Аналіз режимів роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного пристрою для заряджання акумуляторних батарей на базі імітаційного моделювання. Відновлювана Енергетика. 2017. № 2. С. 63–74.
2. Головко В. М., Сандовал К. Порівняльний аналіз експериментальних та результатів імітаційного моделювання роботи автономної вітроелектричної установки з асинхронним генератором з використанням імпульсного пристрою для заряджання акумуляторних батарей. Енергетика і автоматика. 2017. № 2(32). С. 153–160.
3. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2015. 335 с.

УДК 621.311.24

ПРОЯВИ ЕФЕКТУ АВТООПТИМІЗАЦІЇ У ВІТРОЕЛЕКТРОУСТАНОВКАХ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ

***Г. М. Стрункін.*[1]**

магістр, інженер, ТОВ «Плутон ІС»,
вул. Новобудов, 5, м. Запоріжжя, 69076, Україна,
e-mail: strunkingleb@gmail.com

Наведено відомості про виникнення ефекту автооптимізації у вітроелектроустановках з аеродинамічним мультиплікуванням. Узагальнено уявлення про автооптимізацію при різних її проявах.

Ключові слова: *вітроелектроустановки, аеродинамічне мультиплікування, первинна вітротурбіна, вторинна вітротурбіна, потужність, автооптимізація.*

MANIFESTATIONS OF THE AUTO-OPTIMIZATION EFFECT IN WIND POWER PLANTS WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION

***H. Strunkin*[1]**

Master of Engineering, Engineer, Pluton IC LLC,
Novobudov St., 5, Zaporizhzhia, 69076, Ukraine,
e-mail: strunkingleb@gmail.com

Information is provided on the occurrence of the auto-optimization effect in wind turbines with aerodynamic multiplication. The idea of auto-optimization in its various manifestations is generalized.

Key words: *wind power plants, aerodynamic multiplication, primary wind turbine, secondary wind turbine, power, auto-optimization.*

ORCID: [1]0009-0009-1719-4132.

Підвищення ефективності перетворення енергії вітру на електричну енергію залишається актуальною задачею, яка складається з декількох напрямів вирішення. Важливим є намагання розробників відійти від встановлення механічного мультиплікатора [1], завдяки чому вдається підвищити надійність та екологічність вітроелектроустановки (ВЕУ), знизити її шумові характеристики та час і вартість регламентного обслуговування. У цей час все більше приділяють увагу аеродинамічному мультиплікуванню (АДМ) [2]. При аналізі таких ВЕУ виявилася наявність в них ефекту автооптимізації [3]. Ефект автооптимізації було пояснено для часткових випадків. **Метою** цієї роботи є узагальнення якісного пояснення ефекту автооптимізації у ВЕУ з АДМ.

На рис. 1 наведено схему ВЕУ з АДМ. Прийняті позначення: 1 – лопаті первинної вітротурбіни; 2 – гондола з генератором та електрообладнанням; 3 – вторинні вітротурбіни; 4 – опора; Rz – радіус закріплення вторинної вітротурбіни; H – висота осі первинної вітротурбіни.

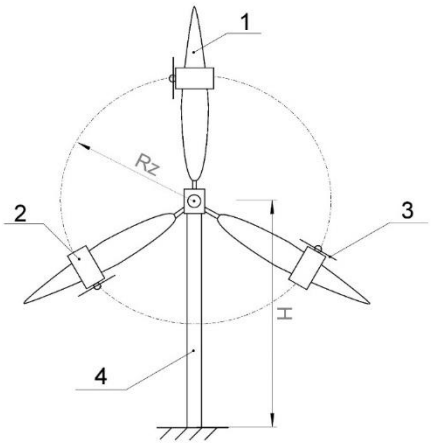


Рис. 1

Вперше можливість автооптимізації у ВЕУ з АДМ було припущено в [4]. Наявність ефекту автооптимізації у ВЕУ з аеродинамічним мультиплікуванням було виявлено при аналізі системи в режимі стабілізації кутової швидкості вторинних вітротурбін вибором режиму генераторів [3]. Виявлений ефект був описаний як феномен. За стабільної кутової швидкості вторинної вітротурбіни при зміні швидкості первинного потоку повітря ВЕУ автоматично вибирала точку оптимального відбору потужності. Математичне пояснення цього ефекту було наведено в [5].

У роботі [6] автори при побудові характеристик потужності вторинної вітротурбіни при зміні її кутової швидкості та сталій швидкості первинного вітрового потоку також виявили наявність зони, в якій система перебувала близько оптимальної потужності. Автори навели якісне пояснення цього ефекту.

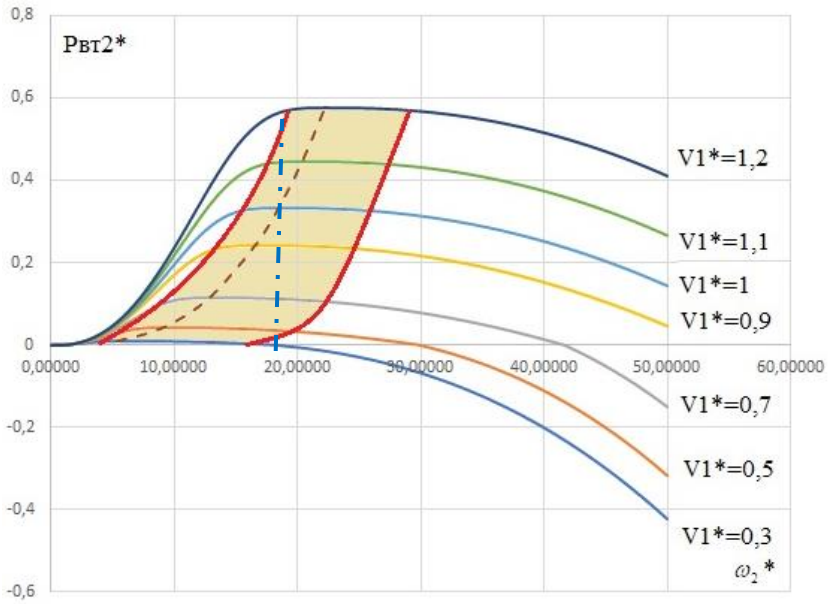


Рис. 2

Для узагальнення уявлення про ефект автооптимізації у ВЕУ з АДМ розглянемо характеристики потужності вторинної вітротурбіни від її кутової швидкості при різних швидкостях первинного вітрового потоку, що було отримано в [6] (рис. 2). Пунктиром зображено лінію максимальної потужності. Як можна бачити, навколо точки максимальної потужності існує зона, коли потужність вторинної вітротурбіни залишається майже постійною при зміні її обертів. Це пояснюється тим, що після досягання максимальної потужності при подальшому зростанні швидкості вторинної вітротурбіни момент опору вторинної вітротурбіни зменшується, і через це знову зростає швидкість первинної вітротурбіни і, відповідно, швидкість вторинного вітрового потоку. Таким чином виникають два зустрічні процеси, коли потужність вторинної вітротурбіни зменшується незначно через те, що збільшення її обертів відбувається разом зі збільшенням вторинного вітру. Цей процес триває доти, доки зниження потужності внаслідок зменшення моменту не почне переважати над підвищенням, пов'язаним зі зростанням вторинного вітрового потоку.

І навпаки – при встановленні номінальних обертів вторинної вітротурбіни на номінальну швидкість первинного вітрового потоку (вертикальна штрихпунктирна лінія), у широкому діапазоні швидкостій первинного вітру потужність вторинної вітротурбіни буде близько оптимальної [4]. Пояснити це можна так. Якщо при номінальних обертах вторинної вітротурбіни та швидкості первинного вітру знижується останній, це призводить до зменшення обертів первинної вітротурбіни та вторинного вітрового потоку. Своєю чергою система стабілізації кутової швидкості вторинної вітротурбіни зменшує її момент для підтримування постійних обертів. Момент гальмування для первинної вітротурбіни також знижується, і система знову приходить в оптимальний режим.

На жаль, через наявність перехресних зворотних зв’язків у моделі ВЕУ з АДМ отримати аналітичний вираз меж зони автооптимізації неможливо. Але систему керування з постійною кутовою швидкістю вторинної вітротурбіни можна поліпшити, якщо дозволити її «люфт» у межах існування ефекту автооптимізації (зона заливки на рис. 2), наблизивши до природних характеристик вітроколеса.

Висновки. У роботі виконано узагальнення уявлення про ефект автооптимізації у ВЕУ з АДМ та наведені рекомендації щодо поліпшення її системи керування.

ПОСИЛАННЯ

1. Ranjan R, Kumar S, Ghosh SK, Kumar M. Experimental and statistical analysis of wear on gear material. Lubrication Science. 2023;1-11. doi: https://doi.org/10.1002/ls.1650.
2. Голубенко Н .С. Ветровая электрическая турбогенераторная установка ТГ-750 / Н. С. Голубенко, В. Е. Олишевская, С. Д. Курдюков, Г. С. Олишевский, С. С. Курдюков. Наука та інновації. 2008. 4, № 6. С. 71–77. doi: https://doi.org/10.15407/scin4.06.071.
3. Голубенко Н. С. Моделирование электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультипликатором в режиме стабилизации скорости ветровых турбин / Н. С. Голубенко, П. Д. Андриенко, 249 И. Ю. Немудрый, Д. Г. Алексеевский. Електротехніка та електроенергетика. Запоріжжя: ЗНТУ. 2011. № 1. С. 70–73.
4. Madsen Y. A., Patent EP 1 390 615, F03D 1/02, F03D 11/00. WIND TURBINE HAVING SECONDARY ROTORS / Technical University of Denmark 2800 Lyngby (DK). – 02735087.5, decl. 29.11.1990; pub. 30.08.2008.
5. Алексеевский Д. Г. Объяснение эффекта автооптимизации электромеханической системы ВЭУ с аэродинамическим мультиплицированием / Д. Г. Алексеевский. Технічні науки та технології. Науковий журнал. Серія: Технічні науки. Чернігів: ЧНТУ. 2015. № 1(1). С. 170–176.
6. Алексієвський Д. Г., Манаєв К. В., Струнκін Г. М. Теоретичні характеристики потужності вторинної вітротурбіни вітроелектричної установки з аеродинамічним мультиплікуванням. Відновлювана енергетика. 2025. № 1(80). С. 82–91.

УДК 621.311

ЗАСТОСУВАННЯ КІНЕТИЧНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ РОБОТИ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК

С. Т. Пазич

НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
вул. Політехнічна, 37, м. Київ, 03056, Україна, тел.:+380442049519, email: pazych.serhii@lll.kpi.ua

Розглянуто ідею застосування кінетичних акумуляторів енергії, тобто маховиків, для сумісної роботи з вітроелектричною установкою або вітроелектричними станціями. Визначено переваги та недоліки їх сумісної роботи в ізольованих енергосистемах.

Ключові слова: *акумулятор, маховик, вітроелектрична установка.*

APPLICATION OF KINETIC ENERGY STORAGE TO IMPROVE THE OPERATION OF WIND POWER INSTALLATION

S. Pazych

NTUU «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», st.Polytehnichna, 37 Kyiv, 03056 Ukraine, tel.:+380442049519, email: pazych.serhii@lll.kpi.ua

The idea of using kinetic energy accumulators, i.e. flywheels for combined operation with a wind power installation or wind power stations, is considered. The advantages and disadvantages of their combined operation in isolated power systems are determined.

Key words: *storage, flywheel, wind turbine.*

ORCID: 0000-0002-6310-9842

Використання вітроелектричних установок показує стабільне зростання у світі протягом багатьох років, як і способи вирішення основної проблеми вітроенергетики, яка полягає в стохастичності вітрового потоку, що спричинює нерівномірне надходження енергії до споживача. Цю проблему частково вирішили приєднанням вітроелектричних станцій до великих електричних мереж, що дало змогу нівелювати мінливість вітрового потоку за рахунок великої потужності електричної мережі порівняно з потужністю вітроелектричної станції. Проте в малій вітроенергетиці приватного сектору та в автономних мережах цю проблему намагаються нівелювати використанням дизельних генераторів / станцій або акумуляторних батарей (для приватного домогосподарства).

Розвиток засобів акумулювання електричної енергії досяг значних показників густини щільності енергії, як в електрохімічних, так і в механічних засобах акумулювання електричної енергії. Одним з найпоширеніших способів акумулювання механічної енергії залишаються хімічні джерела струму, проте для миттєвої віддачі значної кількості енергії протягом короткого часу, від 1 с до 2 хв або декількох годин, пріоритетними є маховики. Маховики дозволяють у відносно компактних розмірах акумулювати значну щільність енергії, що показано в табл. 1. Маховики застосовують як в енергетиці [1], так і в галузях критичної інфраструктури [2] завдяки їхнім компактним розмірам і миттєвій швидкодії. Також маховики широко розглядають при сумісній роботі з вітроелектричною установкою [3].

Енергію маховика можна розрахувати за виразом (1). Момент інерції – за виразом (2).

$$E = \frac{1}{2} I\omega^2 \qquad (1)$$

де − накопичена кінетична енергія, Вт·год; I − момент інерції, кг·м^2; ω − кутова швидкість, рад/с.

$$I = \frac{1}{2} mr^2 \qquad (2)$$

де m – маса ротора; r – радіус ротора, м.

Маховики мають витримувати високі швидкості обертання протягом тривалого часу; їхні механічні властивості залежать від матеріалів, з яких вони зроблені (див. табл. 1).

Таблиця 1. Характеристики роторів маховика

Матеріал	Густина ρ, кг/м³	Міцність на розтягування σ, МПа	Питома енергія Вт/кг	Щільність енергії кВт/м³
Сталь	7800	1800	39	303
Сплав (AlMnMg)	2700	600	38	101
Титан	4500	1200	45	202
Скловолокно (60%)	2000	1600	135	269
Вуглеволокно (60%)	1500	2400	269	404

З огляду на конструктивні особливості (рис. 1) маховики потребуть спеціальених умов експлуатації, а саме розрідженої атмосфери або газу для зменшення тертя та високоякісних матеріалів підшипників або інших механізмів, що весь час взаємодіють з ротором маховика.

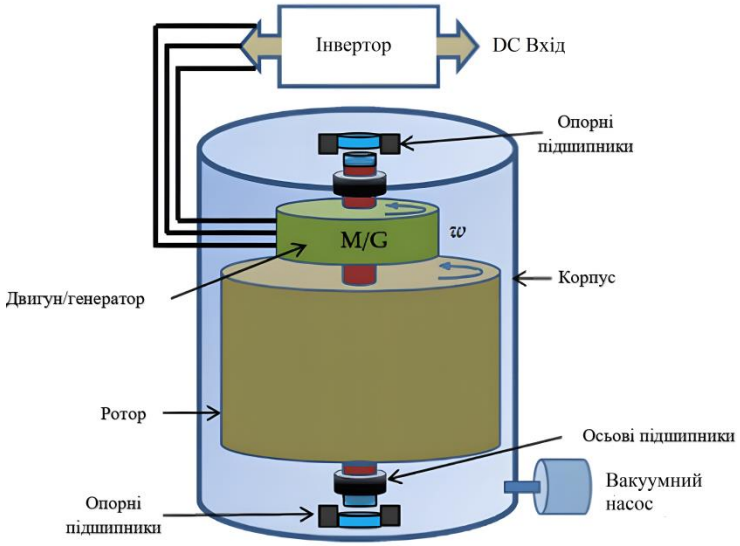


Рис. 1. Конструкція маховика

Застосування маховиків з вітроелектричними установками для покращення вихідної енергії є предметом досліджень останніх десятиліть [4, 5]. Маховики здатні утримувати вихідну напругу на номінальній величині протягом декількох годин, що важливо при роботі вітроустановки на автономного споживача. У великій вітроенергетиці застосування маховиків доцільно для кожної установки вітроелектричної стації окремо, але при цьому зростає вартість самої станції та її обслуговування.

Використання маховиків як накопичувача кінетичної енергії з подальшим її перетворенням на електричну енергію для підтримки роботи вітроелектричної установки обґрунтовано для ізольованих та автономних енергосистем. Водночас термін роботи маховика протягом одного циклу заряду / розряду обумовлений як його потужністю, так і часом підтримки його заряду, оскільки необхідно витрачати енергію на підтримку обертання ротора в режимі очікування до включення. В ізольованих енергосистемах маховики необхідно забезпечити додатковими джерелами живлення, що також підвищує вартість їх експлуатації в порівнянні з централізованою мережею.

ПОСИЛАННЯ

1. ‘World’s largest’ 30MW flywheel energy storage project connects to grid in China. URL: https://www.energy-storage.news/worlds-largest-30mw-flywheel-energy-storage-project-connects-to-grid-in-china/ (дата звернення: 01.04.2025).
2. Piller Power Systems URL:https://www.piller.com/product/energy-storage-flywheels-and-battery-systems/ (дата звернення: 01.04.2025).
3. Choudhury, S. Flywheel energy storage systems: A critical review on technologies, applications, and future prospects. Int. Trans. Electr. Energy Syst. 2021, 31, e13024. https://doi.org/10.1002/2050-7038.13024 .
4. G. O. Cimuca, C. Saudemont, B. Robyns and M. M. Radulescu, "Control and Performance Evaluation of a Flywheel Energy-Storage System Associated to a Variable-Speed Wind Generator," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 4, pp. 1074–1085, June 2006. https://doi.org/10.1109/TIE.2006.878326.
5. Raymond G. Gadelrab, Mostafa S. Hamad, Ayman S. Abdel-Khalik, Amr El Zawawi, Wind farms-fed HVDC system power profile enhancement using solid state transformer based flywheel energy storage system, Journal of Energy Storage. Vol. 4, 2015, pp. 145–155. https://doi.org/10.1016/j.est.2015.10.003.

УДК 621.548

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ВІДЦЕНТРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ РОТОРІВ ВІТРОУСТАНОВОК МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

М. О. Шихайлов, В. П. Коханєвич

Інститут відновлюваної енергетики НАН України
03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 50
тел./факс 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Проведено аналіз низки конструкцій відцентрових регуляторів кутової швидкості роторів вітроустановок та визначено їх конструктивні особливості. Проаналізовано вираз, що описує залежність моменту відцентрових сил від конструктивних параметрів класичного відцентрового регулятора. На основі цього аналізу визначено параметри, які дозволять реалізувати окремі налаштування регулятора.

Ключові слова: *вітроенергетика, вітроустановка, відцентровий регулятор кутової швидкості ротора.*

ANALYSIS OF THE DESIGNS OF CENTRIFUGAL ANGULAR VELOCITY REGULATORS OF ROTORS OF LOW-POWER WIND TURBINE

M. Shikhaylov, V. Kokhanievich

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
03143, Kyiv, Metrolohichna St., 50
tel./fax 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

A number of designs of centrifugal controllers of the angular velocity of wind turbine rotors have been analyzed and their design features have been determined. The expression describing the dependence of the moment of centrifugal forces on the design parameters of a classical centrifugal controller has been analyzed. Based on this analysis, parameters have been determined that will allow for the implementation of individual settings of the controller.

Keywords: *wind energy, wind turbine, centrifugal rotor angular velocity controller.*

ORCID: [1]0000-0003-1845-9904; [2]0000-0003-0033-1355

У вітроустановках (ВУ) малої потужності відцентрові регулятори кутової швидкості застосовуються дуже давно і досить часто – завдяки їхній простоті й надійності. Існує безліч різноманітних конструкцій, запропонованих різними авторами. Приміром, відомі конструкції так званих аеропружних лопатей [1], в яких розподіл мас вздовж лопаті виконаний в такий спосіб, що на кінцях лопатей зосереджені маси, що виконують роль відцентрових тягарців. При досягненні ротором номінальної швидкості обертання лопаті під дією відцентрових сил починають скручуватись, що змінює аеродинамічні характеристики лопатей і ротора в цілому. Фактично це те саме, що закріпити на кінці лопаті відцентровий тягарець, а функцію пружини виконує сама лопать, завдяки власній пружності. Необхідно зауважити, що виготовлення таких лопатей технологічно складне, і ця конструкція не набула широкого розповсюдження. Низку оригінальних конструкцій запропоновано в [2] та [3]. Якщо в конструкції, описаній у [2], на кінцях лопатей просто розташовані відцентрові тягарці, обертальний момент від яких врівноважується моментом від торсіонного вала, що проходить вздовж всієї лопаті й жорстко кріпиться до маточини, то в конструкції, наведеній в [3], ці тягарці виконані у вигляді поршня з діючою на нього робочою рідиною під тиском, який створюється тими самими тягарцями. Як і попередня конструкція відцентрового регулятора, ці конструкції не набули широкого поширення через їхні конструктивні й технологічні складності.

Серед найвідоміших слід відзначити такі конструкції, що обладнані відцентровими регуляторами. Це вітроустановка АВЕУ-4-6 [4] виробництва Астраханського заводу «Ветроэнергомаш» та вітроустановки ВЕУ-08; ВЕУ-1,6; ВЕУ-4 виробництва та розробки Харківського ПП «Світ вітру». У цих конструкціях використовуються відцентрові регулятори кутової швидкості, різні за конструктивним рішенням, але однакові за принципом роботи.

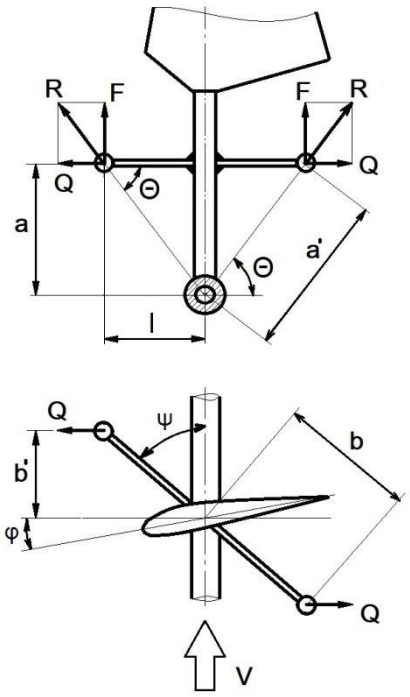


Рис. 1. Розрахункова схема відцентрового регулятора

Розглянемо розрахункову схему найпростішого регулятора – або який ще називають «класичним», – що наведена на рис. 1. Зазначимо, що на рис. 1 не показані всі елементи регулятора, як-от пружини, повзун, елементи кріплення тощо. Отже, під час обертання ротора з кутовою швидкістю ω виникає відцентрова сила R, яка становить:

$$R = m \cdot \omega^2 \cdot a' , \quad (1)$$

де m – маса відцентрових тягарців, a' – відстань від центру мас тягарців до осі обертання.

Момент відцентрової сили, який намагається розвернути лопать у бік збільшення кута установки, дорівнює:

$$M = 2 \cdot Q \cdot b' , \quad (2)$$

де Q – тангенціальна складова відцентрової сили R, b' – плече, на якому сила Q створює момент M.

Відповідно, $b' = b \cdot cos\psi$ а $Q = R \cdot cos\Theta$, *де* b – довжина державок відцентрових тягарців, ψ – кут між державками і віссю ротора.

Тоді вираз (2) набуде вигляду:

$$M = 2 \cdot R \cdot cos\Theta \cdot b \cdot cos\psi . \quad (3)$$

Косинус кута Θ можна визначити зі співвідношення:

$$cos\Theta = \frac{l}{a'} = \frac{b \cdot sin\psi}{a'} . \quad (4)$$

Підставляючи вирази (1) та (4) у рівняння (3), після перетворення отримаємо:

$$M = m^2 \cdot \omega^2 \cdot b^2 \cdot sin2\psi . \quad (5)$$

Аналізуючи отриманий вираз можна зазначити, що максимального значення вираз (5) набуває при $\psi = 45°$, а максимальний діапазон регулювання становить 90°. Також слід звернути увагу на те, що момент жодним чином не залежить від місця кріплення відцентрових тягарців.

ВИСНОВКИ

1. Необхідно враховувати діапазон роботи відцентрового регулятора в 90° під час вибору виду регулювання. Так, при флюгерному регулюванні необхідний діапазон становить 70°…80°, а при антифлюгерному – 35°…40°. Тобто в першому випадку практично неможливо вибрати оптимальну частину діапазону роботи відцентрового регулятора, а другому випадку така можливість є.

2. Оскільки місце кріплення тягарців вздовж маху лопаті не впливає на момент, що розвертає тягарці та лопать, то це дозволяє провести статичне балансування ротора переміщенням кріплення тягарців повздовж маху лопаті.

ПОСИЛАННЯ

1. Півняк Г., Шкрабець Ф., Нойбергер Н., Ципленков Д. Основи вітроенергетики: підручник. М-во освіти і науки України. Нац. гірн. ун-т. 2015. 335 с.
2. Патент України на корисну модель № 73244, опубл. 10.09.2012, бюл. № 17.
3. Патент України на винахід № 113386, опубл. 25.01.2017, бюл. № 2.
4. Харитонов В. П. Автономные ветроэлектрические установки. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006. 280 с.

УДК 621.311.24

АПРОБАЦІЯ АДАПТИВНОГО МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕХНІЧНОГО ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ НА ПЛОЩАДЦІ ПРОЄКТНОЇ ВЕС

К. В. Петренко[1], Д. Ю. Ткаченко

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна

Здійснено апробацію методу визначення технічного вітроенергетичного потенціалу території проєктної вітроелектричної станції (ВЕС). Розраховане значення середньорічного виробництва електроенергії практично збіглося з оцінками комерційних моделей (відносна похибка в межах вибірки ВЕУ аналогічного класу становить від 0,0 до 3,1%). Це свідчить про ефективність адаптивного методу для практичного застосування.

Ключові слова: *вітроелектрична станція, вітроенергетичний потенціал, виробіток електричної енергії ВЕС.*

TESTING OF AN ADAPTIVE METHOD FOR DETERMINING TECHNICAL WIND ENERGY POTENTIAL AT THE PROJECT WIND POWER PLANT SITE

K. Petrenko[1], D. Tkachenko

Institute of renewable energy, NAS Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv.

The method for determining the technical wind energy potential of the site for a proposed wind power plant (WPP) was tested. The calculated value of the average annual electricity production closely matched the estimates provided by commercial models (the relative error within the sample of wind turbines of a comparable class ranged from 0.0% to 3.1%). It confirms the effectiveness of the adaptive method for practical application.

Keywords: *wind power plant, wind energy potential, WPP electricity generation.*

ORCID: [1]0000-0002-2322-9030

Визначення загального потенціалу вітроенергетичних ресурсів як на рівні континенту або держави, так і в межах окремого регіону, області чи громади є важливим чинником у формуванні інвестиційної привабливості території. Така оцінка дозволяє попередньо визначити доцільність і перспективність будівництва вітрових електростанцій у конкретному місці.

Представлений в [1] адаптивний метод визначення вітроенергетичного потенціалу території враховує наступні параметри:

- швидкість та напрямок вітру найближчої метеорологічної станції за період не менше 10 років;
- особливості вертикального профілю вітру;
- схему розташування ВЕУ по території – відстань між ВЕУ для забезпечення їх оптимальної роботи;
- технічні параметри ВЕУ – криву потужності, висоту турбіни, діаметр ротора;
- конверсійні та мережеві втрати – втрати при перетворенні енергії вітру у електроенергію та при передачі електроенергії в електромережу.

Відповідно до базового сценарію описаного методу [1], для розрахунку потенціалів встановленої потужності та виробітку електричної енергії за умови наявності переважаючого напрямку вітру на території, що досліджується, відповідно до ГКД 341.003.001.002-2000 [2], пропонується застосовувати схему розстановки вітрових електричних установок (ВЕУ) 3*d* Х 8*d (d* – діаметр вітроколеса ВЕУ). Для розрахунків використано модель ВЕУ, технічні характеристики якої є у відкритому доступі – *Vestas V-162-5600* [3] з діаметром вітроколеса 162 м та висотою осі ротора 120 м. Для оцінки доцільності застосування пропонованого методу визначення технічного вітроенергетичного потенціалу території та валідності отриманих результатів було використано значення окремих технічних параметрів проєкту

ВЕС ТОВ «ВІНД ФАРМ» в Донецькій області, виконаного компанією *Deutsche WindGuard GmbH* (прогнозований середньорічний виробіток є математичним очікуванням *GROSS* виробітку електричної енергії ВЕС за сценарієм P-50, отриманим в результаті моделювання з використанням програмного забезпечення *WindPro*) (табл. 1).

Таблиця 1. Прогнозований середньорічний виробіток електричної енергії для проєкту ВЕС (за даними *Deutsche WindGuard GmbH*) та розраховані за адаптивним методом оцінки вітроенергетичного потенціалу

ВЕУ	Прогноз Deutsche *WindGuard GmbH*				Адаптивний метод оцінки	
	GE 6.0-164/6000	V-162-6200	EN 171-6.25-6250	V-162-7200	V-162-5600	
					Базовий сценарій	Адаптований сценарій
Висота осі ротора ВЕУ, м	128	124	140	119	120	120
Швидкість вітру на висоті осі ротора, м/с	7,6	7,5	7,7	7,4	7,75	7,75
Площа території ВЕС, км^2	153,2	147,44	147,44	127,65	143,93	143,93
Кількість ВЕУ, шт.	134	129	128	111	229	144
Щільність потужності, МВт/км^2	5,25	5,42	5,43	6,26	8,90	5,59
Очікуваний виробіток ВЕУ, млн кВт·год/рік	24,13	24,29	25,01	25,13	21,81	21,81
Очікуваний виробіток ВЕС, млн кВт·год/рік	**3232,9**	**3133,5**	**3201,6**	**2789,6**	**4991,28**	**3133,5**

Виходячи із середньої для чотирьох ВЕУ з прогнозу *Deutsche WindGuard GmbH* площі проєктної ВЕС, спершу, відповідно до базового сценарію методу (за умови наявності переважаючого напрямку вітру – щільність потужності становить 8,90 МВт/км^2), було розраховано прогнозований середньорічний виробіток електричної енергії ВЕС (табл. 1).

Проте, щільність потужності, що закладена в базовому сценарії методу, не може точно враховувати всі особливості рельєфу та орографії конкретної площадки, на відміну від прогнозу *Deutsche WindGuard GmbH.*

Тому в наступному розрахунку (адаптований сценарій) було застосовано середню для чотирьох ВЕУ (GE 6.0-164/6000, V-162-6200, EN 171-6.25-6250, V-162-7200) щільність потужності (5,59 МВт/км2) (рис. 1).

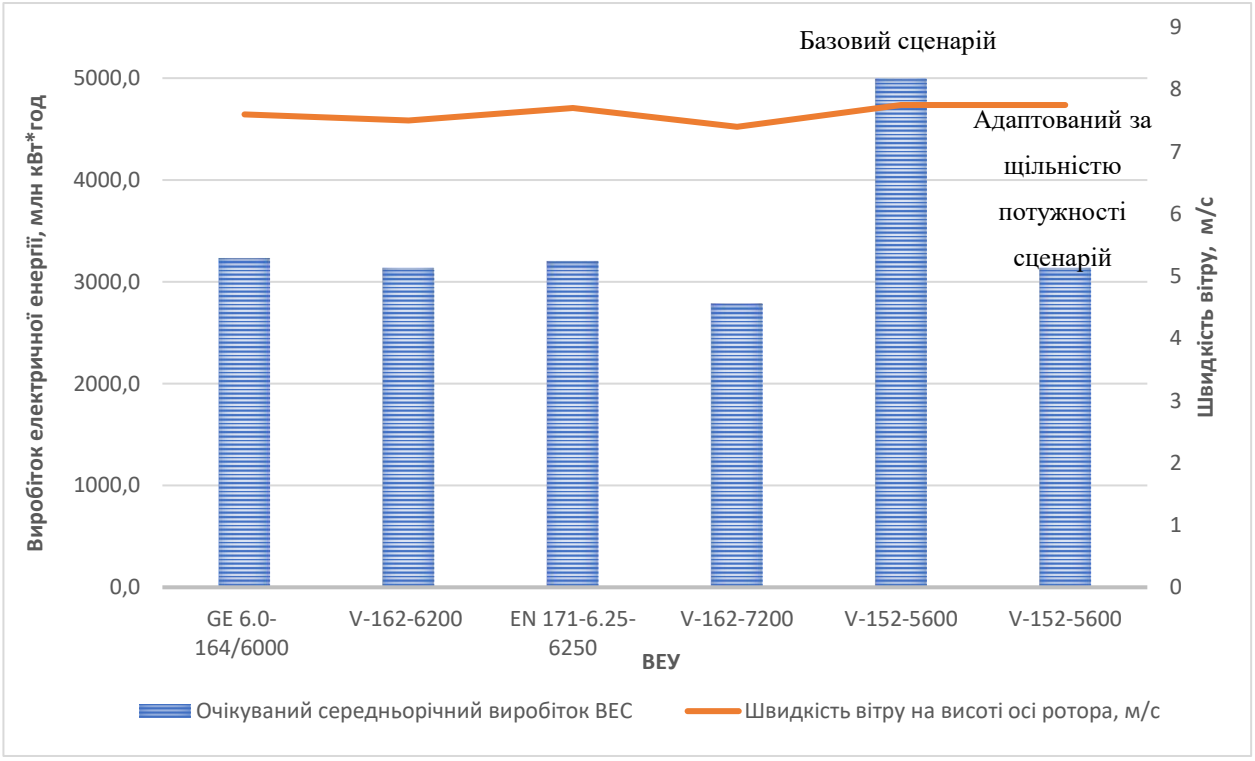


Рис. 1. Очікуваний середньорічний виробіток проєктної ВЕС

Аналіз табл. 1 дає можливість встановити величину відносної похибки прогнозування очікуваних середніх швидкостей вітру на висоті осі ротора та середньорічного виробітку електричної енергії проєкованої ВЕС.

Так, для ВЕУ 6-мегаватного класу (співставних з ВЕУ, технічні характеристики якої використовуються як в базовому, так і в адаптованому за показником щільності потужності сценаріях) відносна похибка становить 0,0 – 3,1%, а для ВЕУ 7-мегаватного класу – 12,3%.

Висновки

Висока ступінь співпадіння отриманих результатів для ВЕУ співставного класу потужності свідчить про придатність пропонованого адаптивного методу для вирішення практичних завдань оцінки вітроенергетичного потенціалу території з точністю, співставною з комерційними моделями, які наразі наявні на ринку.

ПОСИЛАННЯ

1. Петренко К. В., Аушева Н.М., Кардашов О.В. Методика оцінки вітроенергетичного потенціалу території України з використанням геоінформаційних систем / Відновлювана енергетика. – 2024, №4. – с. 68-81. https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/489/398
2. ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електрич них станцій / Жовмір М.М., Симонов А.С. та інші – Київ: Мінпаливоенерго України, 2001. - 52 с.
3. The Wind Power [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.thewindpower.net/turbine_en_1664_vestas_v162-5.6mw.php (дата звернення: 01.05.2025).

УДК 669.187.2.001.7

ДЕРЖАВНЕ ЗАМОВЛЕННЯ НА РОЗРОБЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВИГОТОВЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ З ОТРИМАННЯ ВОДНЕВОГО ПАЛИВА

В. А. Жовтянський[1], В. П. Гончар[2], М. В. Остапчук[3], О. Б. Сезоненко[4]

Інститут газу НАН України,
вул. Дегтярівська, 37, м. Київ, 03113, Україна,
тел.: (044)455-59-01, e-mail: zhovt@ukr.net

Обґрунтовується вибір технологічного процесу газифікації золошлакових відходів електростанцій у складі сировини для виробництва водневого палива.

Ключові слова: *водневе паливо, кам'яне вугілля різного ступеня метаморфізму, шлами, флотація, електродугова плазма, плазмотрон постійного струму, НВЧ плазмотрон, пароплазмова газифікація, пароплазмокиснева газифікація*

STATE ORDER FOR DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY AND MANUFACTURING OF EQUIPMENT FOR HYDROGEN FUEL OBTAINING

V. Zhovtyansky[1], V. Gonchar[2], M. Ostapchuk[3], O. Sezonenko[4]

Institute of Gas of the National Academy of Sciences of Ukraine,
37 Degtyarivska St., Kyiv, 03113, Ukraine,
tel.: (044) 455-59-01, e-mail: zhovt@ukr.net

The choice of the technological process of gasification of ash and slag waste from power plants as a raw material for the production of hydrogen fuel is justified.

Keywords*: hydrogen fuel, coal of various degrees of metamorphism, sludge, flotation, electric arc plasma, direct current plasmatron, microwave plasmatron, steam-plasma gasification, steam-plasma-oxygen gasification*

ORCID: [1]0000-0002-9532-423X; [2] 0000-0001-9938-2421; [3]0000-0003-2331-5737; [4] 0000-0001-6386-2044

У 2024 році черговий конкурсний відбір науково-технічних (експериментальних) розробок на державне замовлення за рахунок коштів державного бюджету був проведений Міністерством освіти та науки (МОН) за новим механізмом. Уперше відбір тематики проєктів здійснювався не на основі пропозицій потенційних учасників конкурсу, а в межах вихідних технічних завдань (ТЗ), сформованих міністерствами, «компетенція яких є домінуючою у відповідній сфері правового регулювання». Одним із 22 відібраних для реалізації став проєкт «Розроблення технології та виготовлення дослідного зразка обладнання з отримання водневого палива з вуглецевмісних середовищ (кам'яного вугілля різного ступеня метаморфізму, шламів тощо)», ТЗ на який було сформовано Міненерго. У ньому визначено, що ключовою вимогою якісного характеру до виконання роботи є встановлення параметрів та розробка способів отримання водню з твердої вуглецевмісної сировини (кам'яного вугілля різного ступеня метаморфізму, шламів тощо) та шахтного метану в плазмохімічних процесах методами пароплазмової газифікації.

Саме ТЗ в оголошенні про конкурс виписане під один з методів отримання плазми – як можна зрозуміти, в умовах електричної дуги з накладанням магнітного поля, що утворюють проточний реактор.

Проте для отримання плазми можуть використовуватися й інші технічні засоби: плазмотрони постійного або змінного струму або ж на основі ВЧ чи НВЧ-розряду (два останні – безелектродні). Всі вони мають принаймні перевагу відсутності вразливості електродної системи під впливом хімічно агресивного середовища в реакторі газифікатора. Це дозволяє реалізувати процес газифікації з використанням кисню.

Крім способів отримання технологічної плазми різниця може полягати також в способах організації реакторного процесу: 1) в проточному реакторі, як у розробників ТЗ, 2) в шахтному реакторі, як це передбачено в нас з використанням плазмотрона постійного струму, для переробки, заданої умовами ТЗ сировини. В останньому випадку процес газифікації здійснюється в добре теплоізольованому потужним шаром футерівки циліндричному об'ємі – теплові втрати енергії мінімальні, а отже, енергоефективність процесу максимальна.

Одним з найістотніших для енергоефективності технології факторів є вибір способу газифікації вуглецевмісної сировини:

- пароплазмовий на основі майже виключного використання електричної енергії, яка вводиться з плазмою, як у розробника ТЗ;
- пароплазмовий з додатковим уведенням кисню, який у процесах часткового окиснення вуглецю киснем стає основним джерелом енергії, що вводиться в об'єм реактора.

Останній варіант є набагато ефективнішим, як показано в наших публікаціях [1–3]. (Слід зазначити, що в ТЗ не ставиться задача вирішення питання вилучення водню з суміші продуктових газів на виході реактора).

Підсумовуючи, виходимо на кілька ключових кількісних показників, які характеризують різницю обох підходів щодо реалізації проєкту на прикладі переробки внашому проєкті золошлакових відходів електростанцій (ЗШВ), які найскладніші для газифікації, оскільки сировиною для них є графітизоване вугілля (для переробки вугільних шламів процес буде ефективнішим):

Показник	Вимоги розробників ТЗ	Вимоги ТЗ проєкту авторів
Продуктивність по вуглецьводневмісній сировині при потужності плазмотрона до 160 кВт	60 кг/год	200 кг/год
Рівень технологічної готовності	*TRL4 – розробку перевірено в лабораторних умовах*	*TRL6 – здійснено випуск дослідного зразка, розробку успішно продемонстровано у відповідному середовищі*

Що стосується технологій отримання водню з шахтного метану, то вони в обох випадках будуть здійснюватися в умовах проточного реактора. (Задача вилучення власне метану з шахтних газів не ставиться). Проте в умовах розробника ТЗ вони будуть постійно супроводжуватись проблемою стійкості електродів. Світ пішов іншим шляхом: використання НВЧ-плазмотронів, які є безелектродними. У нашому випадку буде реалізована, ймовірно, перша в Україні така технологія з використанням розробки НВЧ-плазмотрона вітчизняного виробника. Реалізація проточного реактора на основі НВЧ-плазмотрона створює також «запасний майданчик» щодо розвитку технологій газифікації пиловугільного палива на основі графітизованого антрациту за аналогією з технологіями плазмового «підсвічування» палива або розпалювання котлів теплових електростанцій [4].

Для забезпечення реалізації технології газифікації ЗШВ розроблена та буде реалізована «в металі» технологія вилучення графітизованого антрациту з масиву цих відходів і завершальною стадією їх вилучення на флотомашинах оригінальної конструкції продуктивністю 10 кг/год. Необхідна для забезпечення всього технологічного процесу газифікації ЗШВ продуктивність флотомашин буде досягатися на основі тиражування їх кількості. Ця розробка виконується на рівні TRL7 – здійснено випуск прототипу, технологію (розробку) успішно продемонстровано у робочому середовищі.

Виконання цієї роботи підтримане Міністерством освіти і науки України за програмою фінансування науково-технічних (експериментальних) розробок на державне замовлення у 2025–2026 рр. за рахунок коштів державного бюджету.

ПОСИЛАННЯ

1. V. Zhovtyansky, V. Valinčius. Efficiency of Plasma Gasification Technologies for Hazardous Waste Treatment // Gasification for Low-grade Feedstock (ISBN 978-1-78923-289-9) / Ed. Yongseung Yun. London: InTechOpen, 2018. P. 165–189. https://www.intechopen.com/chapters/59776

2. Жовтянський В. А., Колеснікова Е. П., Якимович М. В. Середенко П. А. Загальні принципи переробки відходів з вилученням їхнього енергетичного потенціалу на основі плазмових технологій. 3. Порівняльний аналіз впливу кисневого та повітряного дуття та ролі калорійності донних мулів. Энерготехнологии и ресурсосбережение. 2018. № 2. С. 16–31. https://doi.org/10.33070/etars.2.2018.03

3. Жовтянский В. А., Остапчук М. В. Плазменные технологии в проблеме получения «более чем зеленого водорода». Горение и плазмохимия. 2022. 20 (№ 1). С. 11–32. https:// doi.org/10.18321/cpc478; https://cpc-journal.kz/index.php/cpc/article/view/478

4. Жовтянський В. А., Даниленко А. М. Плазмові технології в тепловій енергетиці: причини розбіжності теоретичних оцінок та фактичних показників. Зб. наук. праць XIX Міжнар. наук.-практ. конф. "Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку" (24–25 жовтня 2023 р., Київ). Київ, 2023. С. 182–188. DOI: 10.48126/conf2023#page=183

УДК 661.931

АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВЕЛИКОМАСШТАБНОГО ВИРОБНИЦТВА НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВОГО ВОДНЮ НА ДІЮЧИХ БЛОКАХ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В УКРАЇНІ

М. М. Уланов

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (044) 424-96-42, e-mail: e3therm@gmail.com

Нормована вартість низьковуглецевого водню LCOH отриманого з електричної енергії існуючих блоків АЕС складає 3,12 $/кг H_2, що в 2,5 та 4,7 рази менше за відповідні показники отримані з електричної енергії від вітряних та сонячних електричних станцій відповідно.

Ключові слова: *низьковуглецевий водень, електроліз, середньорічний коефіцієнт використання встановленої потужності, енергоблоки АЕС, нормована вартість водню (LCOH).*

ANALYSIS OF THE ECONOMIC INDICATORS OF LARGE-SCALE LOW-CARBON HYDROGEN PRODUCTION AT OPERATING NUCLEAR POWER PLANT UNITS IN UKRAINE

M. Ulanov

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2a Marii Kapnist St., Kyiv, 03057, Ukraine
phone: (044) 424-96-42, e-mail: e3therm@gmail.com

The Levelized Cost of low-carbon Hydrogen (LCOH) produced from electricity by existing nuclear power plants is 3,12 $/kg H_2, is 2,5 and 4,7 times lower than the corresponding costs for electricity from wind and solar power plants, respectively.

Key words: *low-carbon hydrogen, electrolysis, average annual installed capacity factor, nuclear power plant units, levelized cost of hydrogen (LCOH).*

ORCID: 0000-0003-4639-8221

The world is confronted with an urgent global climate challenge to prevent the increase in global mean surface temperature (GMST) from exceeding 1,5°C above the pre-industrial average, which is likely to have serious consequences for human health and society. Humanity is already 80% of the way to this threshold: GMST for 2018 – 2022 was approximately 1,2°C above the pre-industrial average. In response to this challenge, most countries have agreed to reduce emissions in the Paris Agreement, with renewed national commitments at the Glasgow Climate Pact in 2021. Hydrogen is a clean energy carrier because it does not emit carbon when burned, and thus does not directly contribute to greenhouse emissions. Consequently, energy is poised to play a significant role in the decarbonisation of key sectors in modern societies, road and maritime, steel and chemical production, and heating and cooling buildings. By 2025, it is anticipated that countries with a hydrogen strategy will account for more than 80% of the global gross domestic product. The International Energy Agency (IEA) has provided a roadmap for achieving net-zero emissions by 2050, indicating that approximately 530 million tons of hydrogen per year will be needed worldwide. This represents roughly the demand for hydrogen in 2020, which was around 90 million tons.

Hydrogen strategies are motivated by the necessity for low-carbon hydrogen production. Presently, approximately 96% hydrogen is generated through steam reform of methane or coal gasification. These methods are unsustainable as they consume fossil fuels and produce substantial carbon dioxide emissions. Carbon capture and storage (CCS) processes are well-established, but they reduce production efficiency and there is debate about the extent of uncontrolled methane emissions. While most attention has been paid to water electrolysis using renewable energy, recent studies have also shown the feasibility of alternative low-carbon production routes using nuclear energy. Converting just 4% of current to electricity generated at nuclear power plants would reduce carbon emissions by 60 tons annually. If all hydrogen were produced using nuclear energy, carbon dioxide emissions could be reduced by more 500 million tons per year. Several countries are currently implementing hydrogen production using nuclear power plants to help decarbonize their energy, industrial, and transport sectors. This also allows for increased returns from nuclear power plants, which will contribute to their increased profitability.

Based on the dispatch information on the operation of existing nuclear power plant in Ukraine for 2018 – 2021, the average annual utilization rate of the installed capacity of NPP power units was calculated. It was 69.6% in 2018, decreased to 62.7% in 2020, and increased to 71.2% in 2021. The amount of free electricity that is not used in the Ukrainian energy market at existing NPP units ranges from 3,983 MWh to 5,156 MWh and can be used for the production of low-carbon hydrogen using electrolysis plants. To date, 15 units have been installed at four existing nuclear power plants, with 13 of them being VVER – 1000 with an installed capacity of 1,000 MWh. Therefore, it is advisable to install electrolysis plants with a capacity of 1 GW.

Given the significant investment required to establish an electrolysis plant for producing low-carbon hydrogen, it is essential to enhance the cost-effectiveness of electrolysis by extending its operational hours (a minimum threshold of 5,000 hours per year and an optimal threshold of up to 8,000 hours per year). However, this is hindered by the inefficiency of renewable energy sources, currently allowing for only 2,000 to 4,000 hours of use per year. In this context, nuclear and hydroelectric power offer a dual role: they are both controllable and predictable throughout the year.

An analysis will be conducted to compare the technological, environmental, and cost indicators of low-carbon hydrogen production at an atmospheric alkaline electrolysis plant with an electrical capacity of 1 GW. This analysis is based on the cost of electricity in Ukraine derived from renewable sources such as solar and wind (the «green tariff» effective in 2024) and the cost of electricity at operational nuclear power plants in Ukraine (as of 2024). The obtained data are presented in Table 1.

Table 1. Comparison of technological, environmental and cost indicators of low-carbon hydrogen production at an atmospheric alkaline electrolysis plant with an electrical capacity of 1 GW

Sources of electrical energy	Cost of electricity generation, $/MWh	Relative capacity factors of various electricity generation technologies in Europe, %	Annual low-carbon hydrogen production, thous. kg/year	Required area for capacity generation, ha	CO_2 emissions during hydrogen production according to the life cycle of the installation, kg $CO_{2\ eqv.}$/kg H_2	Levelized cost of low-carbon hydrogen (LCOH), $/kg H_2
SPP	205.02	13 – 16%	21,466	12,686	1.404	14.70
WPP	127.46	33 – 38%	52,556	34,495	0.572	7.68
NPP	41.94	77 – 81%	116,955	337	0.624	3.12

Considering the technological parameters of the electrolysis plant, namely, the consumption of electric energy for the production of 1 kg of hydrogen at 52 kWh and the consumption of feed water at 22 liters, we obtained a total productivity of low-carbon hydrogen amounting to 17,417 kg per hour or 117 thousand tons per year. The Levelized Cost of low-carbon Hydrogen (LCOH) produced from electricity by existing nuclear power plants is 3.12 $/kg H_2, which is 2.5 and 4.7 times lower than the corresponding costs for electricity from wind and solar power plants, respectively.

Based on the analysis of data over the past eight years from four Ukrainian nuclear power plants with a total installed capacity of 13,835 MW (of 2021), an economic analysis was conducted on the specific performance for a typical power unit VVER–1000 with a reactor capacity of 1,000 MW. The average amount of electricity in monetary terms produced by one unit of installed capacity of 1 GW is $155 million. The average net income from the sale of electricity from one power unit with an installed capacity of 1 GW is $127 million.

If a project is implemented to build an electrolysis plant with an electric capacity of 1 GW near an existing unit with a similar capacity, the average cost of low-carbon hydrogen produced will be valued at $655 million, with an average net income from its sale amounting to $345 million. The implementation of this project by Joint Stock Company «National Nuclear Energy Generating Company “Energoatom” will enable the company to enhance specific performance indicators by increasing the volume of product output and, consequently, income in monetary terms for a typical power unit VVER–1000 with a reactor capacity of 1000 MW compared to electricity production. Additionally, it will ensure uniform loading of the power unit throughout the year, thereby improving its operating conditions and extending its life.

The introduction of hydrogen production near the existing typical power unit VVER–1000 with a capacity of 1,000 MW will increase the production volume by 4.3 times and net income by 2.8 times compared to electricity production. Such low-carbon hydrogen production may be particularly relevant, considering Ukraine's commitments to the pan-European course towards decarbonizing the economy, especially the energy sector, and from the perspective of enhancing the economic profitability of the Joint Stock Company “National Nuclear Energy Generating Company “Energoatom” in view of its corporatization.

УДК 621.311

ОГЛЯД ВИТРАТ НА ЕЛЕКТРОЛІТИЧНЕ ВИРОБНИЦТВО ВОДНЮ НА П'ЯТИ ГЕОГРАФІЧНИХ ОСТРОВАХ ЄВРОПИ

І. В. Іванченко[1], О. О. Кармазін[2], К. В. Петренко[3]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
02094, вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна

Розглянуто різні конфігурації систем виробництва водню на основі відновлюваних технологій на п'яти островах Європи. Виконано огляд витрат та економічну оцінку п'яти конфігурацій систем виробництва водню.

Ключові слова: *електролітичне виробництво водню, приєднана до мережі конфігурація, гібридна, зелена гібридна, автономна, витрати, економічна оцінка.*

COST OVERVIEW OF ELECTROLYTIC HYDROGEN PRODUCTION IN FIVE EUROPEAN GEOGRAPHICAL ISLANDS

I. Ivanchenko[1], O. Karmazin[2], K. Petrenko[3]

Institute of renewable energy, NAS Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv.

Different configurations of hydrogen production systems based on renewable technologies on five European islands were considered. Five hydrogen production system configurations' cost overview and economic assessment were performed.

Key words: *electrolytic hydrogen production, grid-connected configuration, hybrid, hybrid-green, autonomous, costs, economic assessment.*

ORCID: [1]0000-0002-5083-4180; [2]0000-0002-7628-6880; [3]0000-0002-2322-9030.

Огляд витрат на електролітичне виробництво водню на п'яти географічних островах Європи виконано на основі ґрунтовного дослідження Лабораторії аналізу енергетичних систем Інституту Пауля Шеррера та Інституту енергетики та інженерії процесів Швейцарії [1]. Дослідження великомасштабного виробництва водню проведено для п'яти географічних островів Європи: Крит (Греція), Ейгеройя (Норвегія), Тенеріфе (Іспанія), Західні острови (Шотландія, Великобританія) і Боркум (Німеччина). Вибрані острови мають високий потенціал відновлюваної енергії (табл. 1) та можуть діяти як центри експорту водню. Конфігурації систем вибрано таким чином, щоб забезпечити добове виробництво водню в 10 т і доставку водню під тиском 80 бар. Використовуються PEM електролізери, добре відомі своєю робочою гнучкістю та швидким часом відгуку. Опріснення води розглядається за допомогою зворотного осмосу для обробки морської води. Витрати на опріснення води становлять 0,018 €/кг H_2. Електроенергія для всієї системи виробництва водню (електроліз води, опріснювальний завод і подальше стиснення водню) постачається різними джерелами електроенергії: береговим вітром, морським вітром, наземною сонячною фотоелектричною системою, електричною мережею та/або шляхом розрядки акумулятора. Для стиснення водню від вихідного тиску електролізера 30 бар до 80 бар встановлено компресор. Зберігання водню забезпечує стабільне постачання водню до виробничих потужностей. Враховуються витрати на виробництво водню, викиди парникових газів протягом життєвого циклу, використання матеріалів і трансформація землі.

Таблиця 1. Коефіцієнти використання встановленої потужності (КВВП) відновлюваних джерел енергії та характеристики електромережі на островах Європи

Острови	КВВП ВЕС офшор	КВВП ВЕС оншор	КВВП СЕС (PV)	Середня ціна на електроенергію в мережі, (€/кВт·год)
Крит	0.39	0.33	0.20	0.064
Ейгеройя	0.56	0.47	0.11	0.039
Боркум	0.59	0.52	0.13	0.038
Тенеріфе	0.49	0.43	0.20	0.048
Західні острови	0.56	0.47	0.10	0.049

Розглядаються такі конфігурації водневих систем: 1) *Підключена до мережі (Grid-connected).* Конфігурація складається з електролізера, підключеного до національної електромережі. Основною мотивацією є те, що вибрані європейські географічні площадки підключені до місцевої або національної електромережі. 2) *Гібрид (Hybrid).* Складається з підключення до мережі, а також прямого підключення до ВДЕ: фотоелектричної, наземної та морської вітрової електроенергії. Основна мотивація – гібридні системи можуть інтегрувати ВДЕ та використовувати електричну мережу як дешевий резервний буфер для постачання та зберігання, що може сприяти зниженню витрат і навантаження на навколишнє середовище. 3). *Зелений Гібрид (Hybrid-Green).* Конфігурація ідентична попередній, тільки обмежена максимальною кількістю річних викидів ПГ, що відповідає рівню зеленого водню відповідно до CertifHy. 4) *Автономна (Autonomous).* Електролізер працює від локальної відновлюваної електроенергії, повністю відключеної від електромережі. Мотивація – географічні острови або інші віддалені місця можуть не мати доступу до національної електромережі й автономні конфігурації є єдиним можливим рішенням у цій ситуації. Може бути застосоване обмеження електроенергії з ВДЕ для збалансування пропозиції та попиту на електроенергію. Ця конфігурація надає можливість додаткового добового виробництва водню у 50 т H_2 та встановлення батареї. 5) Автономна конфігурація має підконфігурацію *автономна з інжекцією (Autonomous-grid injection)* з можливостю продавати надлишок електроенергії, виробленої відновлюваними джерелами енергії, в місцеву електромережу для отримання доходу. Варто зазначити, що в цьому разі стягується плата за мережу.

У табл. 2 представлено встановлені потужності відновлюваних технологій на вибраних островах Європи, а також обмеження виробітку електроенергії (тільки для автономних конфігурацій) як результат проблеми оптимізації.

Таблиця 2. Встановлена потужність ВДЕ та обмеження ВДЕ (тільки для автономних конфігурацій) за даними [1]

Площа, км²	Конфігурація	КВВП, -	Електролізер, МВт	Офшор, МВт	Оншор, МВт	PV, МВт	АБ, МВт	АБ, МВт·год	Офшор, % відкл.	Оншор, % відкл.	PV, % відкл.
Крит 8450	Підкл. до мережі	1.00	23								
	Гібрид	0.96	24		24						
	Зелений Гібрид	0.26	86	15	18	95					
	Автономна	0.48	47	21	22	170	80	329	34	36	61
	Автономна – інж.	0.49	46	20	29	169	73	315	11	11	5
Ейгеройя 20	Підкл. до мережі	1.00	23								
	Гібрид	1.00	23		10						
	Зелений Гібрид	1.00	23		10						
	Автономна	0.51	45	85	10	120	41	500	71	38	50
	Автономна – інж.	0.51	45	85	10	120	41	500	18	10	7
Західні острови 3070	Підкл. до мережі	1.00	23								
	Гібрид	1.00	23		23						
	Зелений Гібрид	0.80	29	18	45						
	Автономна	0.49	47	23	66	48	19	101	52	54	45
	Автономна – інж.	0.48	47	24	72	44	15	61	4	7	10
Тенеріфе 2030	Підкл. до мережі	1.00	23								
	Гібрид	1.00	23		23						
	Зелений Гібрид	0.57	40	14	18	51					
	Автономна	0.60	38	7	13	133	50	266	19	19	42
	Автономна – інж.	0.64	36	7	14	135	49	280	0	1	0
Боркум 30	Підкл. до мережі	1.00	23								
	Гібрид	1.00	23		10						
	Зелений Гібрид	0.64	36	35	10	35					
	Автономна	0.48	48	86	10	140	35	231	68	64	71
	Автономна – інж.	0.48	48	86	10	140	35	231	24	17	18

Економічна оцінка включає всі витрати протягом життєвого циклу різних конфігурацій системи. Передбачається термін служби проєкту або системи 20 років. У табл. 3 наведено результати розрахунку витрат на виробництво водню для всіх п’яти конфігурацій системи.

У підсумку необхідно підкреслити, що гібридні системи демонструють найнижчі витрати на виробництво водню за рахунок можливості: 1) продажу електричній мережі надлишку електроенергії й отримання прибутку; 2) використання мережі як резервного джерела електроенергії для виробництва водню з дуже низькими або навіть негативними цінами на електроенергію; 3) оптимального інтегрування економічно ефективних ВДЕ без потреби в додаткових системах зберігання енергії. Однак ці гібридні конфігурації мають викиди парникових газів, що перевищують стандарти для зеленого водню. Альтернативою є гібридно-зелена конфігурація, хоча при вищих витратах.

Таблиця 3. Витрати на виробництво водню для п'яти конфігурацій системи на п'яти географічних островах Європи (за даними [1])

Конфігурація / Витрати, €/кг H_2		Операційні	Заміна	O&M	Інвестиції - PV	Інвестиції - офшор	Інвестиції - оншор	Інвестиції - електролізер	Інвестиції - батарея	Інвестиції - стиснення та зберігання H_2	Інвестиції - мережі	Всього
Підключена до мережі	Боркум	2.1	0.4	0.2				0.6		0.1	0.2	**3.7**
	Крит	3.6	0.4	0.1				0.6		0.1	0.2	**5.1**
	Ейгеройя	2.3	0.5	0.2				0.6		0.1	0.2	**3.8**
	Тенеріфе	2.7	0.5	0.1				0.6		0.1	0.3	**4.3**
	Західні острови	2.8	0.4	0.2				0.6		0.1	0.3	**4.3**
Гібрид	Боркум	1.8	0.4	0.2			0.4	0.6		0.1	0.2	**3.7**
	Крит	2.5	0.4	0.4			0.8	0.6		0.1	0.2	**5.0**
	Ейгеройя	1.9	0.4	0.2			0.3	0.6		0.1	0.2	**3.8**
	Тенеріфе	1.6	0.4	0.3			0.8	0.6		0.1	0.2	**4.1**
	Західні острови	1.5	0.4	0.4			0.8	0.6		0.2	0.2	**4.1**
Зелений Гібрид	Боркум	-0.2	0.5	1.1	0.8	2.4	0.4	1		0.1	0.3	**6.4**
	Крит	-0.4	1.6	1.4	2.3	1.1	0.6	2.3		0.2	0.2	**9.4**
	Ейгеройя	1.8	0.5	0.2	0	0	0.3	0.6		0.1	0.2	**3.8**
	Тенеріфе	0.1	0.7	0.9	1.2	1	0.6	1.2		0.1	0.2	**6.1**
	Західні острови	-0.2	0.4	0.9	0	1.2	1.6	0.9		0.1	0.3	**5.1**
Автономна інж.	Боркум	-1.5	0.8	2.7	3.4	6	0.3	1.3	1.2	0.6	0.2	**15.0**
	Крит	-1.8	0.9	2	4.2	1.4	1	1.3	1.8	0.6	0.2	**11.6**
	Ейгеройя	-1.4	0.9	2.7	2.9	6	0.4	1.3	2.5	0.6	0.2	**16.0**
	Тенеріфе	-0.7	0.7	1.4	3.3	0.5	0.5	1	1.5	0.6	0.2	**9.0**
	Західні острови	-1.5	0.7	1.7	1.1	1.7	2.6	1.3	0.3	0.6	0.2	**8.8**
Автономна	Боркум	0	0.7	2.8	3.5	5.9	0.4	1.3	1.2	0.6	0.1	**16.4**
	Крит	0	1	2	4.1	1.4	0.8	1.3	1.8	0.6	0.1	**13.1**
	Ейгеройя	0	0.9	2.7	3	5.9	0.4	1.2	2.4	0.6	0.1	**17.2**
	Тенеріфе	0	0.8	1.4	3.3	0.5	0.5	1	1.5	0.6	0.1	**9.6**
	Західні острови	0	0.8	1.7	1.2	1.6	2.4	1.3	0.5	0.6	0.1	**10.1**

Слід зауважити, що розглянуті системи мають регіональну специфіку. Аналогічні кліматичні умови характерні для південних регіонів України, особливо на шельфі біля берегів Одеської, Миколаївської та Херсонської областей [2].

Тому застосування всіх п’яти подібних конфігурацій систем виробництва водню в умовах України можливе з аналогічними витратами. Такі системи мають і соціальне значення, оскільки можуть покращити забезпечення населення електроенергією та теплом в період воєнного та післявоєнного часу.

ПОСИЛАННЯ

1. T. Terlouw, C. Bauer, R. McKenna, M. Mazzotti. Large-scale hydrogen production via water electrolysis: a techno-economic and environmental assessment. Energy & Environmental Science, 2022, 15, 3583–3602, https://doi.org/10.1039/D2EE01023B.
2. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України: Видання третє, оновлене/за заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas_2024_publication.pdf (дата звернення: 19.02.2025).

УДК 690.9

ПРОБЛЕМАТИКА ЗБЕРІГАННЯ ТА ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДНЮ

О. О. Мішин

НТУУ «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
тел.: (093) 431-93-26, e-mail: oleksandirmisin@gmail.com

Розглянута проблематика зберігання й транспортування водню, проведений аналіз методів, особливу увагу приділено перспективним рішенням для підвищення ефективності та безпеки транспортування водню.

Ключові слова: *декарбонізація, воднева енергетика, зберігання водню, транспортування водню, стиснений водень, рідкий водень.*

PROBLEMS OF HYDROGEN STORAGE AND TRANSPORTATION

O. Mishyn

National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute. I. Sikorsky»

The article considers the problems of hydrogen storage and transportation, analyses the methods, and pays special attention to promising solutions to improve the efficiency and safety of hydrogen transportation.

Keywords: *decarbonisation, hydrogen energy, hydrogen storage, hydrogen transportation, compressed hydrogen, liquid hydrogen.*

ORCID: 0009-0005-6585-1409

Останні зміни клімату чітко продемонстрували загрозу глобального потепління: середня температура Землі продовжує зростати, а екстремальні погодні явища стають дедалі частішими. Протистояти цьому може відновлювана енергетика, яка спрямована на зниження викидів парникових газів та перехід на чисті джерела енергії. Одним з ключових рішень у цій сфері є воднева енергетика, яка дозволяє виробляти, зберігати та транспортувати чисту енергію. Зелений водень може стати ключовим елементом в декарбонізації планети. Щороку важливість водню для енерговидобувної промисловості збільшується, особливо це відчувається в транспортному секторі: водневі паливні елементи активно впроваджуються у вантажному та залізничному транспорті, водневі автобуси вже курсують Європою, США, Японією, розробляються водневі двигуни для екскаваторів та вантажної техніки. Науковці прогнозують, що до 2030 року встановлена потужність паливних елементів сягатиме 5600 МВт. Глобальні водневі проєкти відіграють ключову роль у розвитку та впроваджені чистих технологій. Наприклад: проєкт NEOM у Саудівській Аравії передбачає виробництво 650 т зеленого водню в день; перший комерційний експорт рідкого водню з Австралії в Японії продемонстрував потенціал кріогенного судна; у Європі також реалізується амбітний проєкт між ЄС та Нідерландами, який передбачає будівництво електролізного комплексу потужністю 36 000 МВт [1].

Водень – перспективний енергоносій майбутнього, однак через його особливості широкомасштабне використання в енергетиці супроводжується технічними та економічними викликами, особливо у сфері зберігання й транспортування. Основною проблемою є низька густина та велика об’ємність водню. Для ефективнішого перевезення його необхідно стискати до 700 бар, що вимагає використання потужних компресорів та спеціальних міцних балонів [2]. Транспортування в стисненому стані потребує великої кількості транспортних засобів через низьку енергетичну щільність, що може бути в одиниці об’єму, на відміну від традиційних видів палива.

Сховища водню під тиском можна розділити на чотири типи відповідно до типу резервуарів. До типу I належать резервуари, виготовлені зі сталі, в цьому разі лише один матеріал герметизує корпус та сприймає навантаження, максимальний тиск такого сховища 300 бар, що є звичайним значенням для газових балонів, використовуються також великі стаціонарні резервуари типу I з тиском 30–50 бар. Такі резервуари дуже поширенні як стаціонарні системи в промисловому застосуванні, де важливіша низька вартість, а не компактність. Тип II підтримує найвищій рівень тиску серед усіх типів – до 1000 бар, це можливо завдяки поєднанню сталевого корпусу з шаром односпрямованого вуглепластику (CFRP) навколо сталевого циліндра. Найчастіше використовуються на заправних станціях для заправки транспортних засобів. У резервуарах III типу для зменшення ваги корпус виготовляють зі склопластику

(GFRP) або вуглепластику (CFRP), що приймає на себе основне навантаження від тиску, для герметизації використовують тонкий шар зі сталі або алюмінію, цей шар називається лайнером, цей тип працює під тиском 350 бар, але за потреби може витримати вищі рівні тиску. Для максимального полегшення конструкції та збільшення міцності був розроблений IV тип сховищ, у цьому разі в ролі герметизації виступає полімерний лайнер, а корпус повністю виготовлений з вуглепластику (CFRP), робочий тиск 700 бар, застосовується в основному для баків транспортних засобів.

Альтернативний метод – зрідження водню, але це передбачає його охолодження до -253 ℃ Також цей процес супроводжується енергетичними витратами – 30–40 % загальної енергетичної цінності водню. Таке транспортування вимагає спеціальних кріогенних резервуарів або танкерів, як-от Suiso Frontier – спеціальне судно для перевезення рідкого водню з Австралії в Японію. На першому етапі перевезено лише 3 т водню, що дуже мало з огляду на те, що ціль проєкта – 20 000 т [1].

Однією з суттєвих проблем є явище «водневої крихкості» - здатності водню проникати в кристалічну ґратку металів та спричиняти деградацію матеріалу разом зі зниженням міцності. Це означає, що існуючі газопроводи можуть бути непридатними для транспортування водню без їхньої модернізації або повної заміни на відповідні варіанти, що значно збільшує витрати на транспортування водню [2].

Одним з перспективних напрямів є хімічне транспортування водню у формі аміаку NH_3, рідких органічних носіїв LOHC або металгідридів MgH_2, $NaBH_4$. Аміак як носій має доволі високу щільність водню 17.6 мас.% гідрогену. Він зберігається зрідженим при температурі -33 ℃ при 1 бар або у стисненому стані 8–10 бар. Перевагою використання цієї технології є висока щільність водню, нульові викиди парникових газів. До недоліків належать токсичність та висока енерговитратність крекінгу [4].

Інший варіант хімічного транспортування – використання рідких органічних носіїв (LOHC). Це спеціальний клас органічних сполук, здатних зворотно поглинати й виділяти водень через реакції гідрування та дегідрування. До основних представників LOHC належать дібензилтолуол, N-етилкарбазол, бензилтолуол, толуїн та метилциклогексан, які забезпечують зберігання 5-6 мас.% водню. Технологія передбачає гідрування при 150–200 °C та дегідрування при 250–300 °C, працюючи при тисках 30–50 бар, що дозволяє ефективно зберігати водень у рідкій фазі за кімнатної температури. До переваг такого використання можна віднести низьку летючість і вибухобезпечність при кімнатній температурі, можливість транспортування в звичайних нафтоцистернах. До недоліків належать обмежена ємність в порівнянні з аміаком та металгідридами, та значна енерговитратність при деградуванні на теплові втрати [4].

До основних представників металгідридних систем належать: сполуки на основі легких металів MgH_2, $NaBH_4$, $LiAlH_4$ та інтерметаліди FeTi, $LaNi_5$, які демонструють ємність зберігання водню від 1,5 до 7,6 мас.% залежно від хімічного складу. Технологія передбачає адсорбцію водню при кімнатній-підвищеній температурі (20–150 °C) та тисках 2–30 бар, тоді як десорбція зазвичай вимагає нагріву до 150–400 °C, що обумовлено ендотермічним характером процесу виділення водню. Перевагами є вища об’ємна щільність порівняно з газоподібним зберіганням, а до недоліків належать значна вага конструкції та необхідність теплового управління [4].

Стискання, зрідження та рекуперації водню супроводжуються значними енергетичними втратами, що знижує загальну ефективність його використання. Додатковим викликом є відсутність єдиної глобальної інфраструктури для транспортування та зберігання водню, що наразі робить його менш конкурентоспроможним порівняно з традиційними видами палива.

Науковці постійно працюють над оптимізацією процесів зберігання й транспортування. Сучасні дослідження зосереджені на розробці матеріалів, які можуть значно покращити ефективність зберігання водню. Серед перспективних варіантів нанопористі полімери PIM-1 – це спеціальні полімери, які мають розвинену систему пор на молекулярному рівні, гарною аналогією буде губка, що здатна утримувати воду. Такий матеріал абсорбує водень у 1000 разів ефективніше, ніж традиційні сорбенти, це можливо завдяки високій питомій площі поверхні полімеру PIM-1. Важливим поліпшенням є температура зберігання, яка підвищилася до кімнатної за помірного тиску, що значно зменшує затрати на зберігання газу. Такий метод можна використовувати в стаціонарних водневих сховищах, які можна інтегрувати в енергосистему для накопичення та вивільнення водню, або в паливних елементах для воднево автомобілів, що потребують компактних систем зберігання [3].

Альтернативний варіант – матеріали на основі графену або вуглецевих нанотрубок, вони також мають високу питому площу поверхні та можуть оборотно поглинати та вивільняти водень. Завдяки великій площі поверхні графену, до 2600 $м^2/г$, водень може «прилипати» до атомів вуглецю. Нанотрубки більше схожі на резервуари, куди проникають молекули водню, це можливо через дуже маленький діаметр, 0,7–5 нм, такі канали можуть бути одношаровими або багатошаровими. Ця технологія може також застосовуватися у транспортній галузі або водневих мобільних пристроях, таких як портативна електроніка [2].

Для масового зберігання водню можна використовувати соляні каверни. Оскільки сіль є герметичним матеріалом, що не пропускає газ, то в соляних пластах можна створити великі підземні порожнини й заповнювати їх воднем, що дозволить зберігати великі запаси водню, одне таке сховище може вмісти 50 000–500 000 $м^3$ гідрогену. Цей метод є перспективним для України, оскільки на території є соляні утворення, які можна адаптувати під сховища, це буде дешевше, ніж будувати наземні резервуари, безпечніше, оскільки газ перебуватиме під землею, що зменшить ризики витоків і вибухів, та ефективно через герметичність солі [2].

Як було сказано вище, зрідження водню потребує великих енергетичних затрат – до 40 % енергетичної цінності водню, але є способи розв'язання цієї проблеми. Для зменшення втрат через випаровування можна використовувати багатошарову вакуумну ізоляцію з декількох теплоізоляційних шарів. Для оптимізації процесу зрідження рекомендується використовувати багатоступеневе охолодження, що дозволить зменшити загальні енергетичні витрати й використовувати комбіновані холодоагенти для зменшення споживання енергії [3].

Висновок: Водень має потенціал стати ключовим енергоносієм завдяки своїй універсальності, екологічності та можливості виробництва без викидів CO_2. Але поки не будуть вирішені технологічні та економічні проблеми з його ефективним зберіганням та транспортуванням, він не зможе широк використовуватися у світовій енергетиці. Подальший розвиток цієї галузі потребує інноваційних рішень, зокрема використання нових матеріалів, таких як полімер PIM-1 та графен, що дозволять оптимізувати процеси акумулювання та зберігання водню. Для України перспективним напрямом є підземне зберігання водню у соляних кавернах, що забезпечить ефективне, безпечне та економічно вигідне накопичення енергоносія. Крім того, збережений газ можна використовувати для експорту в країни ЄС, що сприятиме розвитку водневої економіки. Отже, успішне впровадження оптимізованих методів зберігання й транспортування зробить водень конкурентоспроможним енергоносієм, сприятиме глобальній декарбонізації та забезпечить стабільний ринок водневої енергетики.

ПОСИЛАННЯ

1. Hooton B. Understanding Nuclear Reactors. Oxford University Press, 2024. URL: https://academic.oup.com/book/56407 (дата звернення: 12.03.2025).
2. Yang M., Hunger R., Berrettoni S., Sprecher B., Wang B. A review of hydrogen storage and transport technologies. Clean Energy. 2023. Vol. 7. No. 1. P. 190–216. DOI: 10.1093/ce/zkad021 (дата звернення: 12.03.2025).
3. Morris A., Carta M., McKeown N.B., Fletcher P.J., Marken F. Electroanalytical Probing of Triphasic Hydrogen Storage and Transport in Films of Nanoparticulate Polymer of Intrinsic Microporosity (PIM-1). Electrocatalysis. 2025. Vol. 16. P. 162–170. DOI: 10.1007/s12678-024-00905-7 (дата звернення: 12.03.2025).
4. Baetcke L. Hydrogen Transport and Storage Options // Powerfuels / ed. by N. Bullerdiek et al. Cham: Springer, 2025. P. 281–297. URL: https://link.springer.com/book/9783031624117 (дата звернення: 12.03.2025).
5. International Energy Agency (IEA). The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. Paris: IEA, 2019. 203 p. URL: https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen (дата звернення: 12.03.2025).
6. Rivard E., Trudeau M., Zaghib K. Hydrogen Storage for Mobility: A Review // Materials. 2019. Vol. 12. No. 12. P. 1973. DOI: 10.3390/ma12121973 (дата звернення: 12.03.2025).

USE CASES FOR HYDROGEN IMPORTED INTO THE EU AND ITS CERTIFICATION

E. Chvanova[1], Dr. A. Sakhel[2]

HIR Hamburg Institut Research gGmbH,
Paul-Nevermann-Platz 5, Hamburg, Germany, 22765
phone: +49 (0)40 3910 6989-47, e-mail: chvanova@hamburg-institut.com

In ordert to establish a well-functioning certification system for renewable hydrogen and its derivatives to be imported into the EU, it is to define for which purposes this hydrogen may be used in the first place and which requirements it has to comply with.

Key words: *renewable hydrogen, RFNBO, certification, energy disclosure, book & claim, Guarantees of Origin, mass balancing, Renewable Energy Directive, Delegated Acts, Union Database.*

ORCID: [1]0009-0008-8742-1620; [2]0009-0009-7378-3740

Certification refers to the process of assessing whether a product meets a set of criteria. Certificates can carry information about the origin of the energy used in production, as well as when and where it was used. This is usually to provide transparency for customers. The information disclosed may be limited to the origin of the energy, or broader environmental attributes such as land or water use. Certification is essential to provide evidence on the contribution of the use of renewable and low-carbon hydrogen to the greenhouse gas (GHG) emissions reduction. It is also crucial to the development of hydrogen trade, as traded hydrogen and its derivatives cross borders and may move through regions with different accounting systems. In the short to medium term, a certification system is needed that takes into account the interests and regulatory conditions of both exporting and importing countries.

The chain of custody depicts how a specific product has changed ownership throughout the supply chain. In the energy sector, two main chain of custody models, i.e. approaches to establish the physical or administrative connection between the validated production unit and the statement concerning the final product, are used: book-and-claim and mass balance [1, 2, 3]. The book-and-claim principle enables the separate tradability of renewable energy attributes and the underlying energy quantity. According to the book-and-claim principle, an energy quantity corresponding to the guarantee of origin (GO) quantity must also be supplied (GO cannot be supplied without an energy quantity), but this does not have to be linked to the actual underlying energy either in terms of the balance sheet or contractually, i.e. the energy quantity can therefore also consist of grey energy. In contrast to the practice in the book-and-claim system, the verification in the context of preparing the mass balance starts with the production of the raw material, including the documentation of sustainability criteria and greenhouse gas emissions from production, and continues through each step of the production and supply chain. This results in significantly lower verification requirements in the book-and-claim system, as it does not involve the same number of steps, but only the issuance of the book-and-claim certificate (e.g., when feeding into the electricity/gas grid; if necessary, after a prior audit of the installation) and its redemption [4].

The European Union has chosen hydrogen with enhanced sustainability properties, mostly produced from renewable energy, as an integral part of its decarbonisation strategy. It has developed a set of criteria that hydrogen must meet in order to count towards renewable energy targets. This set of criteria applies to both domestic production and imports. The main legal framework is laid down in the EU Renewable Energy Directives 2018/2001 (RED II) and 2023/2413 (RED III), the Internal Gas Market Directive 2024/1788 and Delegated Acts 2023/1184 and 2023/1185. Renewable hydrogen is considered as part of renewable fuels of non-biological origin (RFNBO). In order to qualify as RFNBO, hydrogen must be tracked through a mass balance system, the electricity input must be proven to be renewable (this can be done by cancelling guarantees of origin, provided these contain all the necessary information) in terms of concluded power purchase agreements, additionality, geographical and temporal correlation, and a life-cycle greenhouse gas emission saving of at least 70% compared to a fossil fuel-based comparator must be demonstrated [5].

RED III has extended the application of mass balance systems for "renewable fuels" including RFNBO to all areas where renewable energy targets exist or where renewable energy shares have to be achieved by market players. This applies to Articles 3 (national renewable energy target), 15a (buildings target), 22a (industry target), 23 (heating/cooling target), 24 (district heating target) and 25 (transport target). It is required to demonstrate the renewable origin and compliance with sustainability and emission reduction criteria (Art. 29-30) and to prove that each delivery of gaseous and liquid fuels is considered only once when calculating the share of renewables in gross final energy consumption in the individual Member States in accordance with Article 7(1) RED II. The Union Database (UDB), first proposed in the context of the RED II, is an EU-wide tracking system for liquid and gaseous renewable and recycled carbon fuels. RED II Art. 28 (2; 4) provides for

the UDB to be a central data hub/registry at EU level based on mass balancing systems, which shall prevent multiple counting and claiming of liquid and gaseous fuel certificates, which is particularly relevant for cross-border fuel trade. This database will centrally store the respective certificates and the associated aggregated data for liquid and gaseous fuels that (1) can be counted towards the national renewable energy targets and (2) fulfil the defined sustainability and emission reduction criteria. The UDB aims to improve the transparency and traceability in relation to the Proof of Sustainability (PoS) by ensuring that sustainability and emission saving requirements are tracked throughout the entire value chain through the application of mass balancing principles. Art. 31a, para. 4 RED III states that GOs (i.e. Book-and-Claim certificates) for the energy unit registered in the UDB cannot be traded outside the UDB and can only be cancelled after withdrawal from a single mass balancing facility (in this case the EU interconnected gas network): "Where guarantees of origin have been issued for the production of a consignment of renewable gas, Member States shall ensure that those guarantees of origin are transferred to the Union database at the moment when a consignment of renewable gas is registered in the Union database and are cancelled after the consignment of renewable gas is withdrawn from the Union's interconnected gas infrastructure. Such guarantees of origin, once transferred, shall not be tradable outside the Union database." Therefore, references between GO registries and the UDB need to be established in order to connect the GOs with the PoS of a respective amount of gas within the UDB [6, 7].

Gas disclosure in terms of demonstrating the share of renewable gases and their environmental impact in terms of associated GHG emissions to the final customer has been made mandatory to gas suppliers by the Internal Gas Market Directive 2024/1788 (Annex I, Art. 5). This disclosure must be substantiated by the cancellation of GOs. It is to be introduced by each Member State in its own territory by mid-2026 [8].

The carbon border adjustment mechanism (CBAM), a CO2 border adjustment system building a part of the Fit for 55 Agenda of the EU, prevents goods including hydrogen imported into the EU being in a better competitive position than goods produced in the EU because of lower or non-existent CO2-prices. It aims to equalize carbon costs across borders. Importers must purchase certificates for the greenhouse gas emissions (embedded emissions) of certain materials imported into Europe, unless the carbon price comparable to the price of EU ETS allowances is already paid in the country of origin. If hydrogen is certified for compliance with the RFNBO criteria, the electricity emission factor will be zero and therefore the CBAM cost will be zero [9]. Thus, a combination of electricity GO with a mass balance certificate for hydrogen will be necessary to avoid additional CBAM costs.

The framework for corporate carbon accounting is defined by a number of regulatory requirements (e.g., CSRD Corporate Sustainability Reporting Directive (EU) 2022/2464, EU Taxonomy – (EU) 2020/852) and voluntary standards (Quantification standards: GHG Protocol & ISO 14064, ISO 14067, as the best-known methodological documents for corporate and product climate accounting). These do not (yet) explicitly regulate the carbon accounting of hydrogen from different sources**.** CSRD and European Sustainability Reporting Standards (ESRS) impose legal disclosure obligations on corporate energy users, requiring energy supply sources to be expelled and substantiated through contractual arrangements with suppliers like power purchase agreements or market instruments such as guarantees of origin (GO) [10]. Voluntary initiatives/instruments in the context of decarbonization (SBTi, CDP, RE100) also use the GHG Protocol as a basis for GHG accounting. In the context of progressive decarbonization, the origin of hydrogen will play an ever-increasing role as hydrogen gradually replaces fossil fuels such as natural gas. It will become a relevant differentiating feature in the context of GHG accounting. In the case of renewable hydrogen, there is no need to account for direct emissions as they are zero. Indirect emissions from fuel production need to be accounted for, depending on the production pathway.

It can be seen that different chain of custody principles need to be applied for different targets. Mass balance is used for target accounting, book & claim certificates - guarantees of origin - need to be used for gas disclosure and in most cases to verify the renewable origin of the input electricity for hydrogen production. A close interplay between these two systems is required to ensure reliable tracking and avoid double counting of renewable attributes, and to enable the implementation of a fully fledged certification system across the hydrogen value chain.

A German-Ukrainian research cooperation on the certification of renewable hydrogen is currently underway to support the development of a science-based certification system for renewable hydrogen. The most important application step of the project is to build up the necessary expertise for the development and operation of a cross-border, internationally compatible system of hydrogen certificates of origin for trade between Ukraine and the EU (especially Germany). In order to make the certificates future-proof and responsive to market requirements, their specific application based on the regulatory framework and stakeholder needs has to be considered.

REFERENCES

1. IPHE; IEA (2023): Hydrogen certification 101.
2. IRENA (2023): Creating a global hydrogen market: Certification to enable trade.

3. ISEAL Alliance (2016): Chain of custody models and definitions. A reference document for sustainability standards systems, and to complement ISEAL's Sustainability Claims Good Practice Guide Version 1.0.

4. Chvanova, E. et al (2024): Herkunftsnachweise für Gas, Wasserstoff, Wärme/Kälte: Möglichkeiten rechtlicher, prozessualer und technischer Umsetzung der Register und der Konversion. AP1 Marktanalyse.

5. European Commission (2024): Q&A implementation of hydrogen delegated acts. Version of 14/03/2024.

6. DIRECTIVE (EU) 2018/2001 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources (recast) (RED II).

7. DIRECTIVE (EU) 2023/2413 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 18 October 2023 amending Directive (EU) 2018/2001, Regulation (EU) 2018/1999 and Directive 98/70/EC as regards the promotion of energy from renewable sources, and repealing Council Directive (EU) 2015/652 (RED III).

8. DIRECTIVE (EU) 2024/1788 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 June 2024 on common rules for the internal markets for renewable gas, natural gas and hydrogen, amending Directive (EU) 2023/1791 and repealing Directive 2009/73/EC (recast).

9. International PtX Hub (2023): EXPLAINING THE NEW EU CARBON BORDER ADJUSTMENT MECHANISM (CBAM). Implications for PtX imports to the EU. Published by GIZ.

10. Association of Issuing Bodies (AIB) (2024): REGADISS Stakeholder Workshop Residual mix methodology for gases. URL: https://www.aib-net.org/sites/default/files/assets/news-events/AIB%20Project-Consult/REGADISS/REGADISS_20240903_Stakeholder%20Workshop%20with%20poll%20results.pdf, last checked on 13/09/2024.

ОТРИМАННЯ БІОВОДНЮ ШЛЯХОМ ТЕМНОВОЇ ФЕРМЕНТАЦІЇ

А. І. Бондаренко

Факультет біотехнології і біотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського,
просп. Берестейський, 37, корп. 4, 03056, Київ, Україна,
тел.: (099) 431-16-84, e-mail: bondarenko.andriy@lll.kpi.ua

Водень розглядається в багатьох країнах як важливий вектор альтернативної енергетики та міст до сталого енергетичного майбутнього. Водень можна виробляти з широкого спектру первинних джерел енергії із застосуванням різних технологій виробництва, хоча в цей час більша його частина виробляється з невідновлюваної сировини, наприклад нафти, природного газу та вугілля. Використання біомаси є привабливою альтернативою традиційній сировині, переважно через нульовий чистий ефект викидів CO_2. Ферментативне виробництво водню — це ферментативне перетворення органічного субстрату на біоводень, що здійснюється групою бактерій за допомогою мультиферментативних систем у три етапи, що нагадують анаеробне зброджження. Оптимальним варіантом сировини для отримання біоводню є відходи рослинних господарств, зокрема, солома.

Ключові слова: *водень, ферментативне перетворення, сировина, біомаса, лігноцелюлозний матеріал.*

PRODUCTION OF BIOHYDROGEN BY TEMPORARY FERMATION

A. Bondarenko

Faculty of Biotechnology and Biotechnics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
37 Beresteysky Avenue, building 4, 03056, Kyiv, Ukraine,
tel.: (099) 431-16-84, e-mail: bondarenko.andriy@lll.kpi.ua

Hydrogen is considered in many countries as an important vector of alternative energy and a bridge to a sustainable energy future. Hydrogen can be produced from a wide range of primary energy sources and different production technologies, although currently most of it is produced from non-renewable raw materials such as oil, natural gas and coal. The use of biomass is an attractive alternative to traditional feedstocks, mainly because of its zero net CO2 emissions. Enzymatic hydrogen production is the enzymatic conversion of an organic substrate into biohydrogen by a group of bacteria using multi-enzymatic systems in 3 stages, resembling anaerobic digestion. The optimal raw material for biohydrogen production is plant waste, such as straw.

Keywords*: hydrogen, enzymatic conversion, raw materials, biomass, lignocellulosic material.*

Водень розглядається в багатьох країнах як важливий вектор альтернативної енергетики та міст до сталого енергетичного майбутнього. Водень не є джерелом енергії. Він не є первинною енергією, що вільно існує в природі. Водень — це вторинна форма енергії, яку потрібно виробляти, як і електроенергію. Він є енергоносієм [1].

Водень можна виробляти з широкого спектру первинних джерел енергії цей час, отримують внаслідок термокаталітичних процесів і процесів газифікації з використанням природного газу як вихідного матеріалу; важкі нафти і нафта є наступним за величиною джерелом, за яким іде вугілля. Сьогодні багато досліджень зосереджено на сталому й екологічно чистому виробництві енергії з біомаси для заміни традиційних викопних видів палива. Водень можна виробляти з широкого спектру первинних джерел енергії із застосуванням різних технологій виробництва, хоча в цей час більша його частина виробляється з невідновлюваної сировини, наприклад нафти, природного газу та вугілля. Зокрема, половина водню виробляється внаслідок термокаталітичних та газифікаційних процесів з використанням природного газу, важких нафтопродуктів, нафти та вугілля як вихідної сировини. Використання біомаси є привабливою альтернативою традиційній сировині, переважно через нульовий чистий ефект викидів CO_2. Крім того, виробництво біомаси на стійкій основі, наприклад шляхом вирощування енергетичних культур, підтри-

має сільськогосподарський сектор і збільшить диверсифікацію сільського господарства. Теоретично будь-яка органічна сировина, багата на вуглеводи, жири або білки, може розглядатися як можливе джерело для виробництва біогенного водню за допомогою процесів біохімічної трансформації [2].

Основними процесами переробки сільськогосподарських відходів та екскрементів тварин, як джерел відновлюваної енергії в Україні, є мікробіологічна ферментація з отриманням газоподібних продуктів, зокрема біоводню.

Ферментативне виробництво водню — це ферментативне перетворення органічного субстрату на біоводень, що здійснюється групою бактерій за допомогою мультиферментативних систем у три етапи, що нагадують анаеробне зброджження. Темнова ферментація не потребує світлової енергії, тому можливе безперервне виробництво водню з органічних сполук — вдень і вночі. Процес темного бродіння з гексоз протікає одним з термодинамічно можливих шляхів: ацетатний еквівалент, бутиратний еквівалент або ацетат-етаноловий еквівалент.

Хоча вищевказані процеси відображають шляхи бродіння, починаючи з простих цукрів, у природі вони трапляються досить рідко. Отже, прості органічні сполуки потрібно отримувати зі складних шляхом гідролізу (під час різних процесів попередньої обробки). Одним із відповідних (складних) джерел простих цукрів є лігноцелюлоза, основна складова рослин. Інший лігноцелюлозний матеріал, попередньо оброблений, можна отримати з посліду рослиноїдних тварин. Як основні субстраи можуть використовуватися різні органічні сполуки, як-от вуглеводи, цукри, білки і жири; комплексні органічні субстрати, наприклад стічні води (СВ), багаті органічними речовинами: СВ харчової промисловості, СВ комунальних підприємств; відходи, які містять целюлозу та лігнінцелюлозу; СВ тваринних ферм, цукровмісні СВ, а також СВ, які містять залишки олій та гліцеролу. Серед воденьпродукуючих мікроорганізмів виділяють облігатні анаероби: *C. Butyricum*, *C. acetobutyricum* і *C. beijerinckii*, *C. Thermolacticum*, *C. tyrobutyricm*, *C. thermocellum* і *C. Paraputrificum*, *Clostridium tyrobutyricum* і *Clostridium paraputrificum*, *C. Saccharoperbutylacetonicum;* метилотрофи, метаногенні бактерії, археї, факультативні анаероби: *E. coli*, *Enterobacter* (*E. aerogenes і E. cloacae*), *Citrobacter*, *Klebsiella* і навіть аероби (*Alcaligenes*, *Bacillus*) [3].

Тваринні екскременти є гарною сировиною для метаногенезу, частиною якого є темнова ферментація з отриманням водню, тому використання екскрементів для отримання біоводню є недоцільним. Оптимальним варіантом сировини для отримання біоводню є відходи рослинних господарств, наприклад солома.

Теоретичний потенціал використання соломи (як приклад наводять саме пшеничну солому) для отримання біоводню — 14,6 г H^2/кг субстрату, з розрахунковими 40 % целюлози, 26,6 % хеміцелюлоз (суми пентоз і гексоз), та 6,1 % та 20,5 % пентоз і гексоз відповідно [2].

Підтвердження теоретичного потенціалу використання соломи в практичних дослідах планується в нових дослідженнях найближчим часом.

ПОСИЛАННЯ

1. Korres, N. E., Norsworthy, J. K. (2017). Biohydrogen Production from Agricultural Biomass and Organic Wastes. In: Singh, A., Rathore, D. (eds) Biohydrogen Production: Sustainability of Current Technology and Future Perspective. Springer, New Delhi. URL: https://doi.org/10.1007/978-81-322-3577-4_3
2. Gaweł Sołowski, Izabela Konkol, Adam Cenian, Production of hydrogen and methane from lignocellulose waste by fermentation. A review of chemical pretreatment for enhancing the efficiency of the digestion process, Journal of Cleaner Production, Volume 267, 2020. URL: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121721.
3. Шуліпа Є. О., Черниш Є. Ю. Процеси темнової ферментації для утилізації відходів з отриманням корисних біоосновних продукті. Тези доповідей VII Всеукраїнської науково-технічної конференції «Сучасні технології у промисловому виробництв». Суми: СумДУ. 2020. С. 246−247.

УДК 620.9.546.11

ПІДЗЕМНІ СХОВИЩА ГАЗУ ЯК АКУМУЛЯТОР ЕНЕРГІЇ УКРАЇНИ

О. В. Стогній, С. А. Дякончук, Д. П. Дубров

Філія «Інститут транспорту газу» АТ «Укртрансгаз»,
Гончарівський б-р, 16, м. Харків, 61004, Україна
тел.:(067) 919-46-00, e-mail: stognii-ov@utg.ua

***Ключові слова**: підземне сховище енергії, геологічна структура, підземне сховище газу, водень, воднева енергетика*

Предстпавлено методику багатокритеріального відбору перспективних нафтогазоносних геологічних структур для підземного зберігання водню. Оцінено обсяг зберігання енергії в потенційних підземних енергосховищах.

Враховуючи, що водень є одним з найкращих альтернатив при декарбонізації різних секторів економіки, ключовим питанням є використання існуючої в Україні інфраструктури із забезпеченням балансу капіталовкладень для модернізації й перетворення наявних об’єктів генерації: транспортування – зберігання – споживання. Підземне зберігання водню є важливим аспектом водневої енергетики зважаючи на:

- можливість використання підземних сховищ, створених на основі структур у соляних покладах чи виснажених нафтових і газових родовищах, що мають вже встановлену інфраструктуру, яка може бути адаптована для водню;

- підземне зберігання водню, що опосередковано допомагає зменшити викиди парникових газів, оскільки водень не має викидів при згорянні.

Запропоновано принципово нову роль ПСГ. На відміну від існуючої – оптимізація роботи ГТС та створення запасу на опалювальний сезон – пропонується нова роль підземних структур як універсальних сховищ енергії. Проаналізовано можливості реалізації перспектив зберігання у підземних структурах, придатних для зберігання газів різних видів, що своєю чергою накладає вимоги до розвитку інфраструктури та джерел генерації ОЕС України. За період розвитку нафтогазовидобувної галузі в Україні відкрито більше 500 родовищ, які за параметрами розглянуто як придатні до підземного зберігання газу. В межах проведення досліджень перспективних структур та існуючих ПСГ стало очевидним, що більше 80 % таких геологічних утворень не відповідають більшості допусків для зберігання водню з погляду втрат газу через розвиток біотичних чи геохімічних реакцій та можливої деградації конструкційних матеріалів.

Звідси висновок про можливість використання суто невеликої кількості геологічних об’єктів для зберігання з мінімальними прогнозованими втратами газу. Тому апробовано методику багатокритеріального відбору перспективних нафтогазоносних геологічних структур для підземного зберігання газів, зокрема водню. Методика зосереджена на геологічних, геолого-технологічних та економічних факторах. З огляду на безпекове питання та географічне фокусування пілотних проєктів з генерації водню запропоновано відповідні геологічні структури. Оцінено обсяг зберігання енергії в потенційних підземних енергосховищах, зокрема на заході України, на рівні 30 ТВт·год, що у водневому еквіваленті становить 10 млрд кубів.

УДК 620.92, 662.769.2

ВОДЕНЬ У ВАШОМУ ДОМІ, МРІЯ ЧИ РЕАЛЬНІСТЬ

М. Бенменні

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: mbenmenni@gmail.com

У роботі представлено короткий огляд стану впровадження водневих технологій у забезпечення потреб людей у будинках, приклади таких введених проєктів з використання зеленого водню в домах. Наведено приклади проєктів з використанням зеленого водню для приготування їжі, опалення й повного забезпечення споживання домогосподарства без залежності від зовнішньої мережі.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, зелений водень, водневі технології, електролізер, декарбонизація, опалення та охолодження.*

HYDROGEN IN YOUR HOME, DREAM OR REALITY

M. Benmenni

Institute of Renewable Energy Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
50 Metrlohichna str., Kyiv, Ukraine, 03140
phone: (044) 206-28-09, e-mail: mbenmenni@gmail.com

The paper provides a brief overview of the state of implementation of hydrogen technologies in meeting people's needs in homes, examples of such projects for the use of green hydrogen in homes. Examples of projects using green hydrogen for cooking, heating and full provision of household consumption without dependence on the external network are given.

Key words: *Renewable energy sources, green hydrogen, hydrogen technologies, electrolyzer, decarbonization, heating and cooling.*

ORCID: 0000-0001-6548-2205.

Вступ

Якщо ЄС зміг досягти скорочення викидів парникових газів на 20 % до 2020 року, то здійснення планів з досягнення мети на 2030 рік вимагає подвоєння зусиль, здійснених протягом 15 років. Оскільки на опалення й охолодження припадає половина кінцевого споживання енергії в ЄС, то їх декарбонізація є критичною метою і цей сектор вимагає особливої уваги для досягнення цілей декарбонизації. Впровадження енергоефективних заходів, введення чіткого мониторінгу для економії енергетичних ресурсів в опаленні та швидкий перехід до масштабного використання відновлюваних джерел енергії та інноваційних технологій, зокрема водневих, є найважливишими рішеннями для досягнення істотних результатів.

В Україні з огляду на значні проблеми, повязані з неефективним використанням енергії, де на опалення й охолодження припадає набагато більше половини кінцевого енергетичного споживання, ці проблеми стоять набагато гостріше.

Стан використання ВДЕ для опалення й охолодження в ЕС

За даними Eurostat, частка використання ВДЕ в системі опалення й охолодження в ЄС у 2023 році досягла 26,2 % **[1]**, зі зростанням на 3,3 % порівняно з 2021 роком, коли частка ВДЕ була на рівні 22,9 % **[2]**. Станом на 2023 рік Швеція, як і в попередні роки, лідирувала з часткою ВДЕ в опаленні та охолодженні на рівні 67,1 %, Естонія з показником 66,7 % теж не відстає; ці країни використовують в основному біомасу й теплові насоси.

Натомість в інших країнах, наприклад в Бельгії, цей показник за 2023 рік становив 7,9 % а в Нідерландах – 10,2 %.

21 країна досягла збільшення частки ВДЕ в 2023 році в секторі опалення й охолодження порівняно з 2022 роком, серед них: Греція на – 4,9 %, Мальта – на 7,5 % та Австрія – на 8,1 %, і навпаки, є країни, що зазнали скорочення, зокрема Польща – на 2,2 %, Хорватія – на 1,0 % та Німеччина – на 0,5 %.

Водневі технології в опаленні й охолодженні

Першопрохідцем з використання водню для опалення став Кільський університет у Великобританії, саме для обігріву житла в будинках на території закладу використовувалася суміш з 20 % водню та природного газу [3]. Локальну газову мережу було вибрано через те, що в університету була ізольована від основної окрема приватна система. Експеримент, який проводили енергетики протягом двох років, передбачав здійснення лабораторних випробувань газових приладів і вивчення впливу водню на матеріали в газовій мережі, які мали витримувати нормативну позначку концентрації водню до 23 %.

На початку 2022 року на південному сході Вельсу в регіоні Пембрукшир у межах проєкту Milford Haven: Energy Kingdom, який отримав фінансування від UK Research and Innovation, продемонстрували першу у світі розумну водневу гібридну систему опалення, яка складалася з водневого котла, теплового насоса й системи розумного керування. Система забезпечує більшу гнучкість завдяки переходу від використання зеленого газу до відновлюваної електроенергії, коли вона дешева [4].

Ця воднева гібридна система розглядається як один зі шляхів досягнення кліматичних цілей Великобританії в межах планів зі скорочення викидів парникових газів в опаленні будинків і отриманні гарячої води на 95 % щоб вийти на нульвий рівень до 2050 року. У Великобританії сподіваються, що гібридна установка відіграватиме важливу роль у декаробнизації опалення й отримання гарячої води як для житлових, так і для комерційних будинків, забезпечуючи при цьому одночасне зменшення викидів та можливість контролю над витратами.

Проведені в країні дослідження показали, що майже 50 % будинків не підходять для встановлення автономних теплових насосів з огляду на такі обмеження, як погані теплові характеритситкі, істотні витрати, викликані необхідністю переобладнання багатьох старих будинків новим радіаторами, проведення утеплення стін і підлог тощо. Воднева гібридна система здатна забезпечити побутовим споживачам і підприємствам переваги від доступних систем декарбонізації опалення й отримання гарячої води, оскільки вона може бути інтегрована в існуючі системи опалення без необхідності заміни радіаторів, трубовповодів та інших складових.

Випробування були проведені в будівлі порту Мілфорд-Гейвен такими компаніями, як Offshore Renewable Energy Catapult, Worcester Bosch, Port of Milford Haven, Kiwa UK, Wales & West Utilities та Passive UK, за активної участі Ради округу Пембрукшир.

Котел Worcester Bosch може працювати на водні або від відновлюваної електроенергії, коли вона дешева, завдяки системі розумного управління, розробленій компанією Passive UK.

Компанія Wales & West Utilities заявила, що вона інвестує 400 млн фунтів стерлінгів для підготовки мережі до транспортування екологічно чистих газів, як-от водень та біометан.

Наприкінці 2023 року компанія Duke Energy (США) [5] запустила водневий пілотний проєкт DeBary, за яким планується виробляти, зберігати та використовувати зелений водень на місці. Спочатку запускаються два елктролізери потужністю по 1 МВт на території сонячної станції потужністю 74,5 МВт в окрузі Валусія, штат Флорида. З метою проведення експерименту компанія планує модернізувати одну з чотирьох газових турбін GE 7E для переведення на роботу на водні, у тому ж місці встановлюються резервуари для зберігання водню з подальшим його використанням під час пікового споживання електроенергії.

За результатами проведених випробувань компанія зробіть оцінку, щодо майбутнього використання зеленого водню в її діяльності з постачання електроенергії та газу своїм клієнтам. За твердженнями пана Clift Pompée, керуючого директора з технологій виробництва компанії Duke Energy, пілотний проєкт зеленого водню, над яким працювали три роки, дозволить їм краще зрозуміти, як інтегрувати чистий водень у свої цілі з декарбонизації діяльності компанії шляхом переведення роботи існуючих заводов з природного газу на водень.

Зовсім недавно, на початку минулого місяця, за участю прем'єр-міністра Шотландії відкрили перші водневі будинки в межах проєкту SGN H100 Fife для демонстрації потенціалу водню у зменшенні викидів у домогосподарствах і на підприємствах [6]. Розташовані в Левенмуті, на східному узбережжі Шотландії, будинки дозволять продемонструвати мешканцям, які зареєструвалися в проєкті або живуть у місті, що чистий зелений водень, замість природного газу, може забезпечити приготування їжі та опалення з використанням звичних плит та котлів.

Проєкт SGN H100 Fife може забезпечити 300 домогаподарствам можливість переходу на чисту енергію, а мешканці, які беруть участь у проєкті, мають можливість відвідувати демонстраційні будинки, побачити котли та плити, зроблені компаніями Baxi, Worcester Bosch і Bosch Home Appliances і отримати практичний досвід перед підключенням їх власних будинків пізніше протягом цього року.

З метою забезпечення навчання спеціалістів для обслуговування водневих приладів компанія SGN співпрацює з місцевим коледжем, щоб найближчим часом відкрити перший у Великобританії водневий навчальний заклад.

З цієї нагоди прем'єр-міністр Шотландії, пан John Swinney, заявив: «Ці демонстраційні будинки дозволять мешканцям уявити, яку роль може відіграти водень у створенні теплих і комфортних будинків з нульовими викидами вуглецю. Я вітаю цей важливий крок у реалізації проєкту та з нетерпінням чекаю його завершення».

У межах зусиль з декарбонизації сектору опалення та охолодження, слід звернути увагу на перспективну пропозицію від компанії Siemens, яка пропонує інтегроване рішення для спільної роботи електролізера й теплового насоса, що підвищує коефіцієнт використання енергії до 96 %. Інтегроване рішення поєднує виробництво водню й тепла шляхом використання тепловим насосом відпрацьованого тепла, що виділяється електролізером під час виробництва водню. Це дозволяє підвищити температурний рівень, що робіть можливим використання тепла для теплопостачання, а також забезпечує охолодження електролізера, мінімізуючи потребу в охолоджувальному обладнанні.

Запропоноване комплексне рішення передбачає використання електролізера PEM у стандартній конфігурації з обсягом виробництва водю в 335 кг/год і 1005 кг/год, високотемпературного теплового насоса потужністю 8 МВт або 24 МВт та системи керування накопиченням водню й тепла, яка дозволяє управляти попитом на електроенергію і тепло та енергопостачанням, а також резервом. Блок керування автономно і в реальному часі використовує дані для забезпечення надійної безперервної роботи комплексу **[7]**.

Висновок

Останнім часом часто трапляються повідомлення про перенесення, затримки або відмови щодо проєктів зеленого водню, включно з його використанням в опаленні й охолодженні. Скептики кажуть, що це пов’язано з відсутністю перспективності для водневого сектору, а прихільники переконують в тому, що це тимчасові проблеми, які характерні для початкового етапу будь-якого переходу від однієї епохи до іншої.

Аналізуючи величезний обсяг інформації та повідомлень з водневої тематики, можна з упевненістю сказати, що водневий сектор не занепадає, а борється з труднощами, пов’язаними, зокрема, з глобальним уповільненням дій і зміною політики деяких урядів стосовно зобов’язань з енергетичного переходу й скорочення викидів, що, поки що, не дозволяє зеленому водню конкурувати з викопним паливом.

ПОСИЛАННЯ

1. Heating and cooling from renewables hits 26.2%. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.coolingpost.com/world-news/heating-and-cooling-from-renewables-hits-26-2/ (дата звернення: 17.03.2025).
2. Heating and cooling from renewables gradually increasing [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/DDN-20230203-1 (дата звернення: 06.02.2023).
3. Кінець епохи? Вперше в історії будинки в Британії почали опалювати воднем. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.obozrevatel.com/ukr/green/kinets-epohi-vpershe-v-istorii-budinki-v-britanii-pochali-opalyuvati-vodnem.htm (дата звернення: 13.03.2025).
4. У Великобританії продемонстрували першу в світі інтелектуальну водневу гібридну систему опалення. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/hydrogen-hybrid-heating/8551577/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=gSB6tjZ24u5DlsU (дата звернення: 27.03.2023).
5. Duke Energy запускає перше випробування зеленого водню в комунальному секторі. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/green-hydrogen-duke-energy/8561726/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=iAXKTlKZc85DlsU (дата звернення: 22.11.2023).
6. First Minister opens Scotland’s first hydrogen homes. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://registeredgasengineer.co.uk/first-minister-opens-scotlands-first-hydrogen-homes/ (дата звернення: 14.03.2025).
7. Інтегроване рішення для електролізера та теплового насоса. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/renewable-energy/hydrogen-solutions/integrated-electrolyzer-heat-pump-solution.html (дата звернення: 22.11.2023).

УДК 661.931

МЕМБРАННО-ЕЛЕКТРОДНИЙ БЛОК ДЛЯ ЕЛЕКТРОЛІЗНОГО ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ ТА КИСНЮ

Ю. К. Пірський[1], Ф. Д. Манілевич[2], Я. В. Колосовський[3], А. В. Куцій[4]

[1, 2, 4]Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України,
просп. Палладіна, 32/34, м. Київ, 03142, Україна,
тел.: (044) 225-15-16, e-mail: pirsky@ionc.kiev.ua
[3]Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна

Представлено результати розробки мембранно-електродного блока (МЕБ) для генерування водню і кисню шляхом електролізу води. На основі розробленого МЕБ створено високоефективний електролізер.

Ключові слова: *електролізне генерування водню та кисню, мембранно-електродний блок, електрокаталізатори, каталітичне чорнило.*

MEMBRANE-ELECTRODE ASSEMBLY FOR GENERATION OF HYDROGEN AND OXYGEN VIA ELECTROLYSIS

Yu. Pirskyy[1], F. Manilevich[2], Ya. Kolosovsky[3], A. Kutsyi[4]

[1, 2, 4]V. I. Vernadsky Institute of General and Inorganic Chemistry of NAS of Ukraine, 32/34, Prosp. Palladina, Kyiv, 03142
phone: (044) 225-15-16, e-mail: pirsky@ionc.kiev.*ua*
[3]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Beresteyskyi, Kyiv, 03056

The results of the development of membrane-electrode assemblies (MEA) for the generation of hydrogen and oxygen by water electrolysis are presented. A highly efficient electrolyzer was created based on the developed MEA.

Key words: *generation of hydrogen and oxygen via electrolysis, membrane-electrode assembly, electrocatalysts, catalytic ink.*

ORCID: [1]0000-0002-9431-4136; [2]0000-0001-5582-833X; [3]0000-0001-5924-1798; [4]0000-0003-2576-7075

Потреби підприємств енергетики, металургії, харчової, скляної, хімічної та напівпровідникової галузей промисловості в чистому водні постійно зростають [1]. Все більше чистого водню необхідно для живлення батарей паливних комірок, якими оснащують екологічно чисті транспортні засоби. Інтерес до електрохімічного методу розкладання води на водень і кисень обумовлений простотою і надійністю водних електролізерів, високою чистотою водню і кисню, що генеруються, можливістю отримання газів під високим тиском безпосередньо на виході з електролізера, високим ресурсом роботи електролізерів, а також доступністю і дешевизною джерела водню – води [2]**. Широке застосування електролізу води для генерування водню та кисню стримується високими затратами електроенергії на його проведення.**

Метою цієї роботи була розробка мембранно-електродного блока (МЕБ) з протонпровідною мембраною та платиновим або іридієвим каталізатором для генерування водню та кисню шляхом електролізу води і створення на основі розробленого МЕБ високоефективного електролізера.

Для пришвидшення катодного виділення водню з води було розроблено платиновий каталізатор, іммобілізований на вуглецевому носії. Використання такого носія для платинового каталізатора дозволило не лише підвищити каталітичну дію платини, але й дало можливість контролювати гідрофобні властивості каталізатора, які є важливими для ефективного виділення водню. Приготування електрокаталізатора Pt/C проводили із застосуванням поліол-методу, використовуючи водний розчин гексахлорплатинової кислоти H_2PtCl_6, етиленгліколь та окиснену сажу ХС-72. Вміст платини в отриманому композиційному каталізаторі Pt40/ХС-72 становив 40 % [3].

Як електрокаталізатор анодного виділення кисню була використана іридієва чернь, для отримання якої використали гексахлоріридієву кислоту H_2IrCl_6. Відновлення іридію проводили лужним розчином борогідриду натрію з додаванням полівінілпіролідону (ПВП), який забезпечував більшу дисперсність отриманої іридієвої черні.

Для нанесення електрокаталізаторів на газодифузійні шари (ГДШ) готували каталітичні чорнила, які напилювали на ГДШ за допомогою аерографа та висушували. До складу каталітичних чорнил окрім відповідного каталізатора входили мономер протонпровідної мембрани Nafion D521 та дистильована вода. Кількість нанесеного каталізатора

визначали за результатами зважування ГДШ на аналітичних терезах до та після нанесення каталітичного шару. Каталітичний шар на катодному ГДШ містив каталізатор Pt40/ХС-72, а як анодний каталізатор випробували платину та іридієву чернь з різним вмістом ПВП. Фінальною стадією формування МЕБ було спікання катодного та анодного ГДШ з протонпровідною мембраною за температури 120 °С.

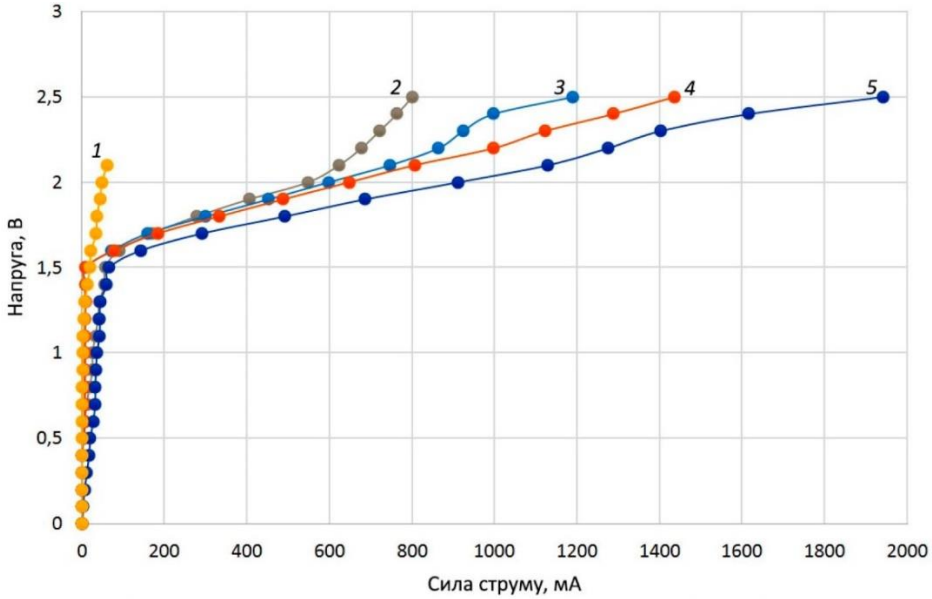


Рисунок. Вольт-амперні характеристики МЕБ електролізера води з катодним каталізатором Pt40/ХС-72 та наступними анодними каталізаторами:
1 – Pt; 2 – Ir без ПВП; 3 – Ir + 0.2 % ПВП; 4 – Ir + 0.6 % ПВП; 5 – Ir + 1.2 % ПВП

Із залежностей, приведених на рисунку, випливає, що використання іридієвої черні як каталізатора анодного виділення кисню замість платини дозволяє покращити характеристики МЕБ електролізера води на декілька порядків. Це пояснюється меншими значеннями перенапруги виділення кисню на іридії, ніж на платині. Отже, використання іридієвої черні як електрокаталізатора анодного виділення водню з води є більш доцільним, ніж платини.

Наведені на рисунку залежності також свідчать, що використання ПВП (0,2 %, 0,6 %, 1,2 %) при синтезі іридієвої черні позитивно впливає на робочі характеристики МЕБ. Збільшення кількості ПВП в анодному каталізаторі від 0 до 1,2 % приводить до значного покращення характеристики МЕБ при однаковому завантаженні електрокаталізатора на одиницю поверхні ГДШ. Пояснюється це тим, що ПВП, який вводиться в розчин під час синтезу іридієвої черні, запобігає агрегуванню утворених її частинок та забезпечує утворення каталізатора з високою питомою площею активної поверхні. Вміст ПВП в анодному каталізаторі 1,2 % є оптимальним, оскільки при додаванні більшої його кількості ускладнюється виділення синтезованого каталізатора з реакційної суміші. ПВП перешкоджає осіданню дрібних часток черні, внаслідок чого вихід готового продукту зменшується.

Проведені ресурсні випробування розроблених МЕБ протягом 800 год показали високу стабільність їхніх електрохімічних характеристик, що свідчить про те, що використані каталітичні матеріали, іммобілізовані на ГДШ, добре відповідають вимогам.

Таким чином, в процесі цієї роботи синтезовано активні електрокаталізатори виділення водню (Pt40/ХС-72) і кисню (Ir чернь + 1.2 % ПВП) з води та розроблено метод іммобілізації таких каталізаторів на газодифузійних шарах, що дало можливість створити високоефективні та стабільні МЕБ електролізерів води.

ПОСИЛАННЯ

1. El-Shafie M. Hydrogen production by water electrolysis technologies: A review. Results in Engineering. 2023. V. 20. 101426. URL: https://doi.org/10.1016/j.rineng.2023.101426.
2. Kamaroddin M.F.A., Sabli N., Abdullah T.A.T. at all. Membrane-Based Electrolysis for Hydrogen Production: A Review. Membranes. 2021. V. 11, Issue 11. 810. URL: https://doi.org/10.3390/membranes11110810.
3. Пірський Ю. К., Манілевич Ф. Д., Куций А. В., Колосовський Я. В. Створення мембранно-електродних блоків паливних елементів з градієнтними каталітичними шарами. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: Матеріали XXIV Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 18-19 травня 2023 р.). К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2023. С. 83-84. URL: https://doi.org/10.36296/renewable.conf.18-19.05.2023.

УДК 621.311.25

ВИЗНАЧЕННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЕВИХ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ПРОТОННООБМІННОЮ МЕМБРАНОЮ

В. О. Коровушкін[1], С. В. Бойченко[2], І. О. Шкільнюк[3]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Берестейський, 37, м.Київ, 03056, Україна
тел.: (095) 768-63-93, e-mail: vitalijkorovuskin@gmail.com

Розглянуто ключові параметри ефективності PEMFC, такі як вольт-амперні характеристики, кінетика електрохімічних реакцій, омічні втрати, масообмінні процеси, структура електродів та каталізаторів, а також термін служби системи.

Ключові слова: *водневий паливний елемент, PEM, енергоефективність, надійність.*

DETERMINATION OF THE PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF HYDROGEN FUEL CELLS WITH A PROTON EXCHANGE MEMBRANE

V. Korovushkin[1], S. Boichenko[2], I. Shkilniuk[3]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (095) 768-63-93, e-mail: vitalijkorovuskin@gmail.com

The key parameters of PEMFC efficiency, such as volt-ampere characteristics, kinetics of electrochemical reactions, ohmic losses, mass transfer processes, electrode and catalyst structure, and system life are considered.

Key words: *hydrogen fuel cell, PEM, energy efficiency, reliability.*

ORCID: [1]0000-0002-7571-7124; [2]0000-0002-2489-4980; [3]0000-0002-8808-3570

Основні властивості паливних елементів, які можна охарактеризувати, це: загальна продуктивність (вольт-амперна крива, густина потужності), кінетичні властивості (електрохімічно активна поверхня), омічні властивості (питомий опір, провідність електроліту, контактний опір, електродний опір, міжелектродний опір), масообмінні властивості (втрати тиску, гомогенність реагенту / продукту), паразитні втрати (витоки, побічні реакції, перехресне перетікання палива), структура електродів (пористість, звивистість, провідність), структура каталізатора (товщина, пористість, завантаження каталізатора, розмір частинок, електрохімічно активна поверхня, коефіцієнт використання каталізатора, іонна провідність, електропровідність), структура потоку (перепад тиску, розподіл газу, провідність), теплогенерація / тепловий баланс, питання терміну служби (випробування на термін служби, деградація, циклічність, запуск / зупинка, вихід з ладу, корозія, втома).

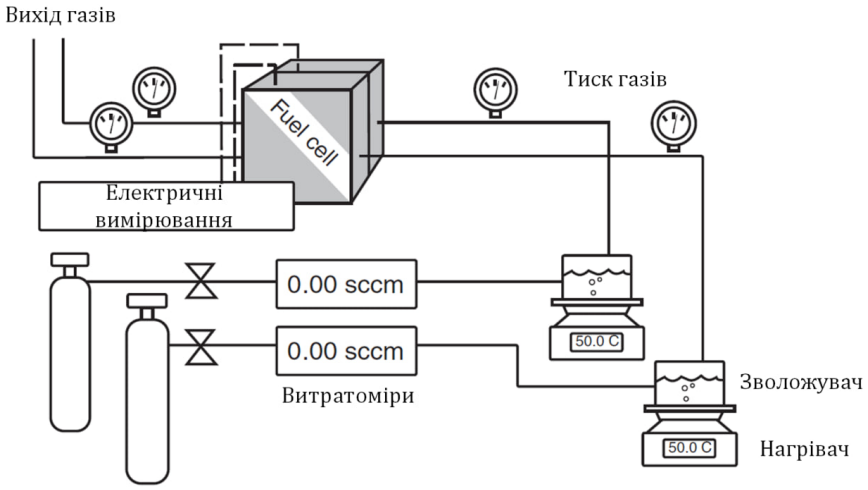


Рис. 1. Типова випробувальна станція. Контролюються тиск, температура, рівень вологості та швидкість потоку газів

Методи визначення характеристик паливних елементів можна поділити на два типи:

1. Електрохімічні методи визначення *(In Situ*). Ці методи використовують електрохімічні змінні напруги, струму і часу для характеристики продуктивності пристроїв на паливних елементах в умовах експлуатації.

2. Методи визначення характеристик в умовах експлуатації (*Ex Situ*). Ці методи характеризують детальну структуру або властивості окремих компонентів, що складають паливний елемент, але зазвичай тільки компоненти, вилучені з середовища паливного елемента в незібраному, нефункціональному вигляді.

В області електрохімічної характеристики *in situ* існує чотири основні методи:

1. Вимірювання струму-напруги (j-V). Найпоширеніший метод характеристики паливних елементів, вимірювання j-V забезпечує загальну кількісну оцінку продуктивності паливного елемента і щільності потужності паливного елемента.

2. Вимірювання переривання струму. Цей метод розділяє внески в продуктивність паливного елемента на омічні та неомічні процеси. Універсальний, простий і швидкий, метод переривання струму може бути використаний навіть для потужних систем паливних елементів і паралельно з вимірюванням вольтамперних характеристик.

3. Електрохімічна імпедансна спектроскопія (EIC). Цей складніший метод може розрізняти омічні, активаційні та концентраційні втрати. Однак результати можуть бути складними для інтерпретації. Крім того, EIC є відносно трудомістким, і його важко реалізувати для потужних систем паливних елементів.

4. Циклічна вольтамперометрія (ЦВ). Це ще один метод, який забезпечує розуміння кінетики реакції паливного елемента. Як і EIC, циклічна вольтамперометрія може займати багато часу, а результати можуть бути складними для інтерпретації. Він може вимагати спеціальної модифікації паливного елемента, що тестується, і/або використання додаткових тестових газів, таких як аргон або азот.

В області визначення характеристик *ex situ* варто виділити такі методи:

1. Визначення пористості. Ефективні структури електродів і каталізаторів паливних елементів повинні мати добре контрольовану пористість. Існує декілька методів визначення пористості структур зразків, хоча багато з них є руйнівними тестами.

2. Вимірювання площі поверхні методом Брунауера – Еммета – Теллера (BET). Продуктивність паливних елементів критично залежить від використання каталізаторів з якнайбільшою площею поверхні. Деякі електрохімічні методи дають приблизні значення площі поверхні, однак метод БЕТ дозволяє з високою точністю визначати площу поверхні ex situ практично для будь-якого типу зразка.

3. Газопроникність. Навіть високопористі електроди паливних елементів можуть бути не дуже газопроникними. Тому для розуміння масопереносу в електродах паливних елементів вимагає вимірювання проникності на додаток до визначення пористості. Випробування електролітів на газопроникність має вирішальне значення для валідації ультратонких мембран, де витоки газу можуть виявитися катастрофічними.

4. Визначення структури. Широкий спектр методів мікроскопії та дифракції використовується для дослідження структури матеріалів паливних елементів. Під структурою тут розуміють розмір зерен, кристалічну структуру, орієнтацію, морфологію тощо. Це визначення дуже важливе при розробці нових каталізаторів, електродів, електролітів, або коли використовуються нові методи обробки.

Висновок. Для визначення робочих параметрів водневої паливної комірки зручно застосовувати дві групи методів: In Situ, що використовуються для діагностики втрат, оптимізації умов експлуатації та Ex Situ, що акцентують увагу на характеристиках матеріалів наприклад, каталізаторів з високою поверхнею, довговічних електролітів та забезпечують теоретичну базу для їх розробки.

ПОСИЛАННЯ

1. Fuel Cell Fundamentals / S.-W. Cha et al. Wiley & Sons, Incorporated, John, 2016. 608 p.).

2. PEST- AND SNW-ANALYSIS OF THE USE OF LIQUID HYDROGEN AS A MOTOR FUEL IN AVIATION / S. Boichenko et al. System Research in Energy. 2025. Vol. 2025, no. 1. P. 61–73. URL: https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.061 (дата звернення: 13.04.2025).

УДК 621.35

ЕКСПЛУАТАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ МУЛЬТИШАРОВИХ ПОКРИТТІВ НА ОСНОВІ СПЛАВІВ ZN-NI-CU ДЛЯ ЛУЖНОГО ЕЛЕКТРОЛІЗУ ВОДИ

А. О. Майзеліс

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна,
тел.: (057) 707-66-61, e-mail: a.maizelis@gmail.com

Мультишарові покриття на основі сплавів Zn-Ni-Cu, осаджені двоімпульсним методом, демонструють підвищену каталітичну активність, знижену перенапругу реакції виділення водню та кращу стійкість до деградації, що робить їх перспективними для лужного електролізу води.

Ключові слова: *електроліз, каталітична активність, мультишарове покриття, стійкість до деградації.*

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF MULTILAYER COATINGS BASED ON Zn-Ni-Cu ALLOYS FOR ALKALINE WATER ELECTROLYSIS

A. Maizelis

National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute",
2 Kyrpychova str., Kharkiv, Ukraine, 61002
phone: (057) 707-66-61, e-mail: a.maizelis@gmail.com

Multilayer coatings based on Zn-Ni-Cu deposited by the two-pulse method demonstrate increased catalytic activity, reduced overpotential of hydrogen evolution reaction overvoltage, and better resistance to degradation, which makes them promising for alkaline water electrolysis.

Key words: *electrolysis, catalytic activity, multilayer coating, resistance to degradation.*

ORCID: 0000-0002-5296-9636

Лужний електроліз води вимагає використання корозійно- і механічностійких електродних матеріалів з високою каталітичною активністю. Основними шляхами підвищення ефективності електролізу є зниження перенапруги реакції виділення водню (РВВ), збільшення активної площі поверхні електродів, покращення транспорту газових бульбашок та підвищення довготривалої стабільності матеріалів. У цьому контексті значний інтерес викликають доступні нікельвмісні електрокаталізатори, зокрема сплави системи Ni-Zn-Cu. Одним з перспективних підходів є отримання мультишарових покриттів електрохімічними методами [1], що дозволяє покращити електрохімічні характеристики матеріалу та підвищити його стійкість до деградації.

Мультишарове покриття, осаджене двоімпульсним потенціостатичним методом і додатково оброблене в лужному средовищі, в порівнянні з одношаровими, більш корозійно стійке. Струм обміну РВВ на мультишаровому покритті вищий, ніж на одношаровому, перенапруга виділення водню зменшується на 10−15 %. У процесі періодичної зміни навантаження на електролізер, при збільшенні кількості циклів понад 3000, спостерігається ще істотніше зменшення перенапруги РВВ на мультишаровому електроді, тоді як на одношаровому – збільшення, що обумовлено блокуванням його поверхні водневими бульбашками. Під час прискорених випробувань за розробленою методикою, більш наближеної до умов живлення від відновлюваних джерел енергії, мультишарове покриття демонструє кращу стійкість до деградації, яка пов'язана з вилуговуванням Zn і зміною фазового складу поверхні, та можливість його регенерації. Таким чином, дешеве мультишарове покриття на основі сплавів Zn-Ni-Cu є перспективним електродним матеріалом для електролізу води завдяки високій каталітичній активності, розвиненій механічно стійкій поверхні та покращеній, у порівнянні з аналогічними покриттями, довготривалій стабільності.

ПОСИЛАННЯ

1. Maizelis A., "Electrochemical Formation of multilayer coatings: copper-nickel alloys and oxo-hydroxides," Lambert Academic Publishing, 2021.

УДК 621.424

FEATURES OF USING HYDROGEN FOR CARBURETOR ENGINES

V. Dubovyk[1], K. Cherneha[2], M. Haiko[3], V. Kurganska[4],

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Beresteyskyi Prospect, Kyiv, 03056, Ukraine,
phone: (044) 204-8225, e-mail: processor-w@ukr.net

This paper presents aspects of fuelling a spark ignition engine with gasoline and hydrogen. The influence of hydrogen on the cylinder mixture, on the energy and emissions of the engine is analysed.

Keywords: *spark ignition engine, hydrogen use, emissions and pollution*

ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЮ ДЛЯ КАРБЮРАТОРНИХ ДВИГУНІВ

В. Г. Дубовик[1], К. В. Чернега[2], М. Р. Гайко[3], В. І. Курганська[4]

КПІ ім. Ігоря Сікорського, Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (044) 204-8225, e-mail: processor-w@ukr.net

У цій статті представлені аспекти заправки двигуна з іскровим запалюванням бензином та воднем. Аналізується вплив водню на суміш в циліндрах, на енергію та викиди двигуна.

Ключові слова: *двигун з іскровим запалюванням, використання водню, викиди та забруднення*

ORCID: [1]0000-0001-8884-8222; [2]0009-0000-9016-9587; [3]0009-0003-9856-7485; [4]0009-0003-6419-1993

Active and passive methods of reducing exhaust emissions have caused them to decrease significantly over the level of the 1980s. However, the problems of air pollution and the greenhouse effect are far from being solved. International organizations and institutions are pushing for measures to reduce emissions, especially the implementation of "zero-emission" (ZEV) vehicles. Hydrogen can be used as a fuel in two ways: in internal combustion piston engines or in fuel cells. Research into the use of hydrogen as a fuel for spark ignition engines is divided into two directions: additive fuel or total gasoline substitution with hydrogen. Compared to the gasoline-powered engine, the fully hydrogen-powered engine runs more economically at low loads, but it can create a decrease in performance at high loads due to the high volumes of space needed in the combustion chamber. Combining the advantages of the two fuels led to the use of gasoline with the addition of hydrogen. An important aspect is that emissions are significantly reduced due to hydrogen's very good combustion properties and the high diffusivity that helps form a homogeneous mixture. Nowadays, hydrogen is produced from fossil fuels, water or biomass. Regrettably, fossil fuels are the main resource for large-scale production, which aggravates the carbon cycle. Because of environmental criteria, its production should be from renewable sources (green hydrogen). Widespread use of hydrogen raises concerns about fuel safety and lifecycle costs (investment cost, production cost, supply cost, market price, demand, storage and distribution costs). Aryal K and Wang L conducted a study which pointed out the properties that make hydrogen an excellent alternative fuel for internal combustion engines. The large range of flammability and the high speed of flame propagation enable hydrogen to run well on very lean mixtures. Low density, which leads to exceptional diffusivity, helps hydrogen mix with other fuels, and high selfignition temperature allows a higher compression ratio, which leads to better efficiency. Nevertheless, hydrogen`s very low density results in volumetric sizing problems requiring special tanks. Shivaprasad K V observed an increase in thermal efficiency when fuelling with a mix of gasoline and hydrogen up to a fraction of 20% hydrogen. HC and CO emissions drop with the increase of hydrogen, but high NOx values are observed when operating at rich mixtures. Studies conducted by [1], [2], [3] and [4] showed that compared with the original gasoline engine, direct injection of hydrogen improved performance on combustion characteristics, but also had the disadvantage of higher levels of NOx emissions. Using a moderate EGR rate of 15-20% and under 15-20% addition of hydrogen can produce a significant improvement in combustion and emission performance. A remarkable reduction of NOx levels was also achieved by using exhaust gas recirculation (EGR) or water injection. The purpose of this paper is to study the effects of small amounts of hydrogen on the engine performance and emissions when fuelling an automotive spark ignition engine with 1500 cm3 displacement. In Fig. 1, the effects of hydrogen addition on CO emission at different mixtures are presented. CO emissions diminish as the hydrogen gasoline blend percentage increases. At rich mixtures, because of the high carbon content of the mixture, the CO emission isn`t reduced as much, but at stoichiometric mixture, the decrease is notable - 46% less CO. At lean mixtures, the values are quite similar. Due to the high flame speed of hydrogen and stoichiometric air-to-fuel ratio, the fast combustion of

hydrogen rapidly consumes the air, which forms lean-oxygen zones in the cylinder, blocking the formation of CO. As a result of a short combustion and post-combustion period, the necessary time for the CO oxidation reaction is significantly reduced, resulting in lower CO emissions. CO_2 emission can be observed in Fig. 2, indicating an improvement in using hydrogen gasoline blends [5]. The reduction is also a consequence of complete combustion. The combustion process for the gasoline-hydrogen fuel was improved, especially around stoichiometric mixtures, marking a 16 % reduction of CO_2 emissions.

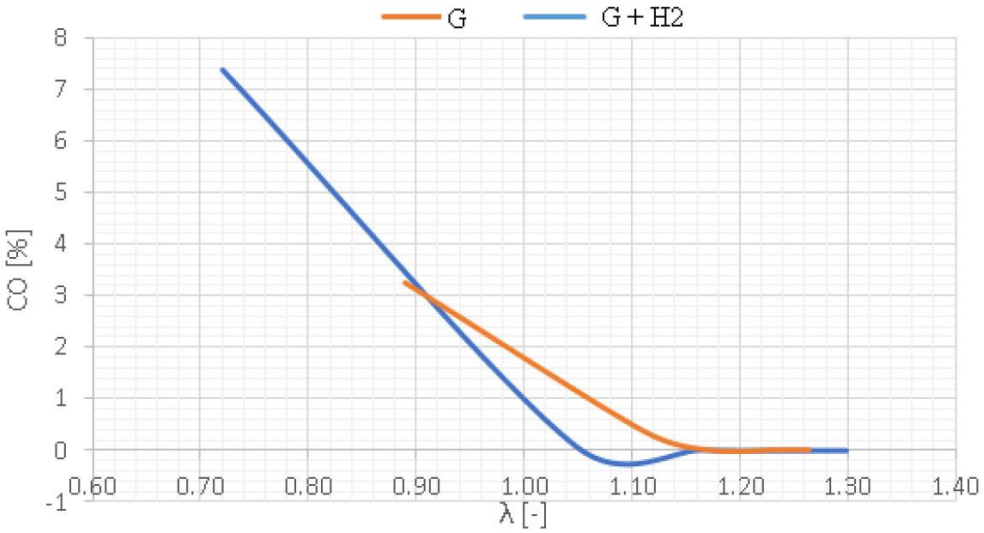


Fig. 1. The CO emission level versus air-fuel ratio

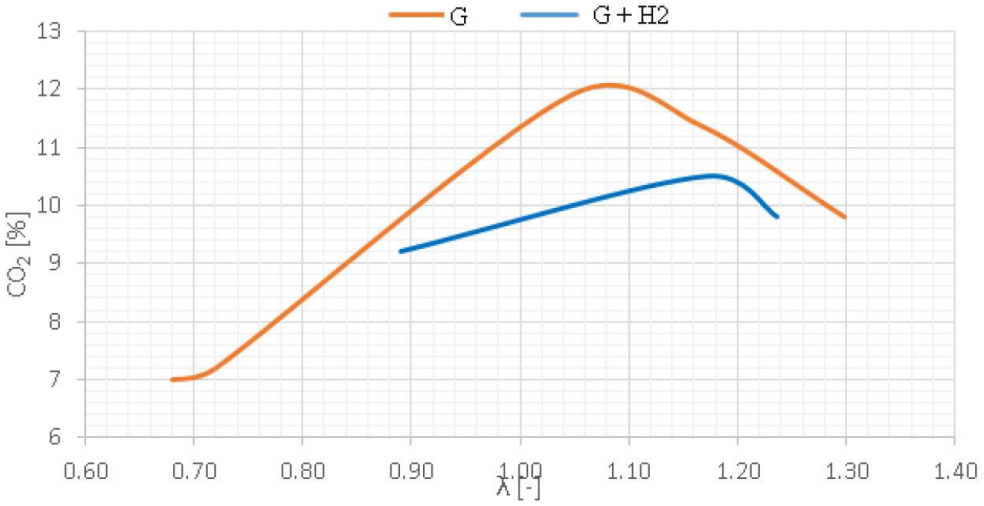


Fig. 2. The CO_2 emission level versus air-fuel ratio

The experiment was carried out with different percentages (up to 7%) of hydrogen injected in the intake manifold. The main conclusions of the experimental investigations are: CO, CO_2 and HC emissions reduce with the increase of hydrogen addition due to the high flame speed of hydrogen and the short quenching distance, which allows the flame to travel near the cylinder wall, thus improving combustion. The high diffusivity property of hydrogen is another reason for better combustion, because of a more homogenous mixture. At the stoichiometric mixture, the level of CO was reduced by 46%, and the CO_2 emission marked a 16% cut. At lean mixtures, the gasoline-hydrogen mix showed a 44% improvement regarding HC emission. The higher hydrogen addition results in a higher combustion temperature, which leads to more dissociation and more NOx emission, causing a 14.8% decrease at lean mixtures.

REFERENCES

1. Aryal K 2017 Hydrogen Fuelled Internal Combustion Engine: A Review Int. J. for Research in Applied Science & Engineering Technology 5 498-506

2. Wang L, Hong C, Li X, Yang Z, Guo S, Li Q 2022 Review on blended hydrogen-fuel internal combustion engines: A case study for China Energy Reports 8 480-6498
3. Rusu E, Pană C, Negurescu N 2013 Experimental study of a spark ignition engine fuelled with gasoline and hydrogen in addition U.P.B. Sci. Bull. Series D, Vol. 75, Iss. 4
4. Pantile V, Pană C, Negurescu N 2013 Improvement of the performance of a spark ignition engine by using hydrogen U.P.B. Sci. Bull. Series D, Vol. 75, Iss. 3
5. Thawko A, Tartakovsky L 2022 The Mechanism of Particle Formation in Non-Premixed Hydrogen Combustion in a Direct-Injection Internal Combustion Engine Fuel 327 125187

ZASTOSOWANIE WODOROWYCH OGNIW PALIWOWYCH DO EKOLOGICZNEGO ELEKTRYCZNEGO NAPĘDU JACHTU MOTOROWEGO

Aleksander Chróściak[1], Jacek Andrzejewski[1], Arkadiusz Zmuda[2]

Politechnika Morska w Szczecinie, Wydział Nawigacyjny, Katedra Oceanotechniki i Budowy Okrętów
1 studenci, 2 wykładowca
ul. Wały Chrobrego 1-2, 70-500 Szczecin, Poland,
e-mail1: 30690@s.pm.szczecin.pl

Przy rozwiązywaniu postawionych w pracy zadań zastosowano ogólne metody analizy teoretycznej bazujące na przygotowaniu teoretycznych linii kadłuba, wyznaczeniu krzywych oporu kadłuba oraz doborze układu napędowego.

Słowa kluczowe: *model jachtu motorowego, układ napędowy, wodorowe ogniwa paliwowe, krzywa oporu kadłuba.*

ORCID[2]**:** 0000-0002-7610-4493

Streszczenie materiałów konferencyjnych

Redukcja emisji szkodliwych substancji, jak również rozwój nowych technologii, są kluczowymi wyzwaniami światowej gospodarki morskiej. Wodór jako źródło energii może stanowić alternatywę dla tradycyjnych paliw, oferując czyste i wydajne źródło napędu. Jedną z kluczowych zalet wodoru w porównaniu do napędów elektrycznych jest możliwość szybkiego tankowania, analogicznie do konwencjonalnych paliw ciekłych i gazowych. W przeciwieństwie do akumulatorów, które wymagają długiego czasu ładowania, wodór może być uzupełniany w krótkim czasie, co znacząco zwiększa operacyjną efektywność jednostki. Celem projektu jest zaprezentowanie koncepcyjnego modelu jachtu motorowego zasilanego wodorowymi ogniwami paliwowymi oraz określenie potencjalnych korzyści i wyzwań związanych z tą technologią.

Projekt badawczy skupia się na zastosowaniu wodorowych ogniw paliwowych jako generatora energii elektrycznej potrzebnej do napędu jachtu motorowego. Głównym celem prowadzonych prac jest analiza możliwości efektywnego wykorzystania tego typu technologii do napędu jachtów motorowych, ocena potencjalnych korzyści płynących z tego typu rozwiązania układu napędowego oraz jego wpływu na środowisko. W artykule przedstawiono koncepcyjne rozwiązanie modelu jachtu, omówiono potencjalne metody implementacji oraz wskazano przyszłe kierunki badań.

Metodyka i założenia projektowe:

- wykonanie pomiarów modelu jachtu – wykonanie precyzyjnych pomiarów modelu jachtu w celu stworzenia jego cyfrowego modelu,
- stworzenie cyfrowego modelu jachtu – opracowanie komputerowego modelu jachtu, który będzie bazą do przeprowadzania analiz i symulacji oraz posłuży do opracowania szczegółowej dokumentacji technicznej,
- obliczenia oporowe i dobór napędu – wykonanie obliczeń oporowych modelu jachtu, na podstawie których zostanie dobrany optymalny napęd zapewniający odpowiednie osiągi i efektywność,
- modernizacja modelu kadłuba jachtu – dostosowanie kadłuba do instalacji dobranego układu napędowego, obejmujące m.in. laminowanie, malowanie oraz wzmocnienia konstrukcyjne,
- analiza technologii napędu – dobór odpowiednich ogniw paliwowych, silnika elektrycznego, linii wału, śruby napedowej, pędników azymutalnych oraz akumulatorów,
- montaż układu napędowego – wyposażenie kadłuba modelu jachtu w niezbędne elementy układu napędowego,
- przygotowanie do testów – opracowanie metod pomiarowych, które pozwolą ocenić efektywność i wydajność układu napędowego,
- inne źródła energii napędowej – dokonanie testów i pomiarów dla różnych źródeł energii.

Zastosowanie ogniw paliwowych może znacząco zredukować emisję gazów cieplarnianych i poprawić efektywność napędu. Główne wyzwania to rozmiar i waga urządzeń potrzebnych do generowania tego rodzaju energii, dostępność infrastruktury do tankowania wodoru, koszt implementacji oraz bezpieczeństwo eksploatacji. W przyszłych badaniach planowane są testy działania systemu na modelu oraz analiza efektywności energetycznej w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych. Jeśli uzyskane wyniki potwierdzą wysoką efektywność i niezawodność tego rozwiązania, w dalszej perspektywie możliwe będzie zastosowanie ogniw paliwowych na pełnowymiarowym jachcie motorowym.

Na zdjęciach 1-3 przedstwiono wejściowy model kadłuba jachtu motorowego.

Zdjęcie 1. Wygląd wstępnego modelu kadłuba jachtu z profilu

Zdjęcie 2. Widok modelu kadłuba jachtu z góry

Zdjęcie 3. Widok na rufę i dziób modelu kadłuba jachtu

Model kadłuba jachtu wykonano ze sklejki. Zewnętrzną powłokę kadłuba stanowi laminat. Został on wstępnie pomalowany, część nad wodnicą pływania na zielono, a pod nią na czerwono. Do kadłuba domontowano wstępny zarys nadbudówki. W celu umożliwienia montażu układu napędowego we wnętrzu modelu pokład w okolicy rufy można zdemontować, co jest widoczne na zdjęciu 2.

W późniejszych etapach prac wnętrze modelu kadłuba zostanie pokryte laminatem, a po odpowiednim jego dostosowaniu zostanie ono wyposażone w napęd z wodorowymi ogniwami paliwowymi.

REFERENCES

1. Ballam O., Manley P.: Elektryczność na jachcie. Wydawnictwo Nautica, Warszawa 2023.
2. Czasopismo Biuletyn techniki jachtowej. Wydawnictwo VETUS, Warszawa 2021.
3. Praca zbiorowa, Napędy hybrydowe, ogniwa paliwowe i paliwa alternatywne. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2010
4. Simpson A.: Elektryczność na jachcie. Oficyna Wydawnicza Alma-Press Sp. z o.o., Warszawa 2017.
5. Zbierski K.: Dieslowskie napędy jachtów. Wydawnictwo Studio M, Łódź 2012.

HYDROENERGY POTENTIAL AND OPPORTUNITIES OF USING IT IN CANALS AND RIVERS

A. Boliev[1], O. Bozorov[2], E. Rabbimov[3]

Tashkent State Technical University named after Islom Karimov
University Street 2, Tashkent
Phone: (+99891) 568-39-49, e-mail: bolievalisher@gmail.com

In solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used, based on the study of the properties of increasing energy efficiency and integrating the generated energy and its cost.

Key words: *autonomous installation, active condensation method, air humidity, obtaining water from air, "dew point" temperature.*

ORCID: [1]0000-0002-4458-7494

Abstract*: This article describes the method of calculating the hydropower potential based on the full energy of the water flow for the construction of micro hydroelectric power plants in ditches, canals, and rivers and the possibility of evaluating small-capacity micro hydropower plants that can be built in them.*

Key words: *micro HPP, hydro potential, dissipation, river, working wheel.*

It is known that HPP technology is used to determine the gross hydropower potential of water sources. In this, the difference between upstream and downstream is defined. In the process of calculating the hydropower technical potential, the hydropower potential of water sources with a small slope relative to the horizon is not taken into account. However, such sources can be used to generate electricity using micro-hydroelectric power plants with a capacity of 1-15 kW. There are options for building many micro-hydroelectric power plants along the canal basin and connecting them to a single system, either to feed them into the general grid or to use them autonomously [1]. Therefore, it is one of the important tasks before the field experts to study the technical potential of water sources such as canals and rivers with a small slope, and to determine the number of capacities of micro hydropower plants that can be built in them.

When theoretically determining the hydropower potential of existing water sources, it is important to take into account that when calculating the kinetic energy of the water flow, the potential energy generated by the slope is lost due to dissipation, not by increasing the speed of the water flow. Using the developed methodology, the total hydropower potential of running water sources in the Andijan region was studied. The results of theoretical calculations showed that the increase in velocity in small reaches of the water source does not occur due to energy dissipation. Therefore, we can assume that the average velocity value is the same along the entire length of the water source. For flow in a rectangular channel of width b and depth h, the average kinetic energy of the flow is determined by solving the Nervier-Stokes equations for an incompressible fluid under appropriate boundary conditions, based on the determination of the law of change of the velocity field:

$$u = \frac{\rho g z(2h - z)}{2\eta} \sin\alpha \tag{1}$$

Here α is the channel slope; η is the water viscosity; b is the channel width; h is the channel depth; ρ is the water density.

Taking into account (1), we obtain the following result for the water flow rate Q and the average velocities [2]:

$$Q = \frac{g\rho b h^3 \sin\alpha}{3\eta}; \qquad V = \frac{g\rho h^2 \sin\alpha}{3\eta}; \tag{2}$$

Based on the above, let's consider the dissipation of potential energy by calculating the change in kinetic energy based on the speed of water flow in the channel. Taking into account the effect of gravity on the water mass, a piece of water with volume dv=bℓdz and mass dm falls to a distance of dh=Vsinα per second with a vertical velocity. This requires an increase in kinetic energy. The elementary work done by the gravitational force in the vertical direction at z = 0 and a distance h is equal to:

$$A = \int_0^h gb\rho\ell V \sin\alpha dz = \frac{g^2 b\rho^2 \ell h^3 \sin^2\alpha}{3\eta} \tag{3}$$

In this case, the change in kinetic energy of the volume dv will be as follows:

$$E = \frac{\rho^2 g^2 \ell b \sin^2 \alpha}{\eta} \int_0^h (h - z)^2 dz = \frac{\rho^2 g^2 \ell b h^3 \sin^2 \alpha}{3\eta} \quad (4)$$

If we compare expressions (3) and (4), we see that the result is the same. So, at small angles of inclination, the change in kinetic energy of the water flow is equal to the force of gravity, so the speed does not increase. Its potential energy is converted into thermal energy, that is, it is dissipated. Average velocities are mainly used to calculate the amount of energy. The kinetic energy calculated using the theoretical expression for the water flow velocity corresponding to the cross-sectional shape of the channel is greater than the kinetic energy calculated using the average velocity. Therefore, it is necessary to know and take into account their ratio, that is, the Coriolis coefficient [3].

Based on the above-mentioned points, our main goal is to calculate the gross and technical hydropower potential of the water sources flowing through the territory of Andijan region, as well as the energy capacity that can be obtained. Table below shows the results of calculating the gross hydropower potential in the districts of Andijan region. Markhamat district, Baliqchi district, Khojaabad district, Asaka district, Jalakuduq district, Izboskan district, Korgontepa district, Altinkol district of Andijan region have a high gross hydropower potential, so it is considered effective to install micro hydropower plants and connect them to the general network in these districts.

Table. Gross hydropower potential in the district section of Andijan region (GW/year)

District name	Gross hydropower potential (GW/year	District name	Gross hydropower potential (GW/year)
Bulagboshi district	0,02 10^3	Markhamat district	70,2 10^3
Asaka District	9,45 10^3	Altynkul district	3,21 10^3
Andijan district	1,10 10^3	Pakhtaabad district	1,05 10^3
Buston district	2,28 10^3	Balikchi district	15,3 10^3
Jalakuduk district	6,21 10^3	Izboskan district	4,15 10^3
Khojaabad district	9,61 10^3	Shahrikhan district	0,13 10^3
Korgontepa district	3,64 10^3	Ulughnor district	0,01 10^3
Total		104.4 103 GW/year	

In 2020, the total annual electricity consumption in the Andijan region was 4.437•103 GW/year, of which the effective electricity capacity was 3.637•103 GW/year [11]. Losses account for the remaining 18.06%. If 0.1% of the total hydropower potential in the Andijan region is developed, 2.5-3% will be recovered.

REFERENCES

1. Bozarov Oybek Odilovich , Usarov Khamidillo Saydullayevich, Saidullayeva Saidakhon Rakhmanovna, Energy potential of solar and water resources in Uzbekistan and their use International Journal of Integrated Education. Volume 5, Issue 10 | October 2022 | 64-67. https://journals.researchparks.org/index.php/IJIE
2. Averin S.I., Minayev A.N., Shvydkiy V.S.," Mechanics of Fluids and Gases", M., 1986, 173-182.
3. Mukhammadiev, M., Glovatskiy, O., Nasyrova, N., Karimova, N., Uulu, A. A., & Boliev, A. (2020, December). Assessment of investment technologies for use of hydro-accumulating stations on intermediate channels of irrigation systems and water reservoirs. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science (Vol. 614, No. 1, p. 012088). IOP Publishing..
4. M. Mamadzhanov , B. Shakirov , O.O. Bozarov, B. Shakirov . The solution of leveling of Nave-Stoksa for the pumping station of the underwater canal, Scientific and technical journal "Uzbekhydroenergetika" 2020 year*#4 (8) 44-43
5. Muhammadiev, M., Urishev, B., Juraev, S., & Boliev, A. (2020, July). Detritus removal from a pumping-plant intake chamber with hydrajet pumps. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 883, No. 1, p. 012123). IOP Publishing.

6. Yuldoshev, I., Shoyusupov, S., Botirov, B., Jamolov, T., & Boliev, A. (2023, March). Experimental verification of the mathematical model of the temperature regime of a solar-fuel trench greenhouse. In AIP Conference Proceedings (Vol. 2612, No. 1). AIP Publishing.

7. Khasanov, M. Y., Kamel, S. M., Kurbanov, A. A., Jalilov, U. N., Boliev, A. M., & Suyarov, A. O. (2023, November). Optimal Planning of Distribution Network with DG Units and ESS Considering Costs. In 2023 IEEE XVI International Scientific and Technical Conference Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE) (pp. 1790-1796). IEEE.

8. Shoguchkarov, S., Yuldoshev, I., Saitov, E., & Boliev, A. (2020). The effect of the surface geometry of a photovoltaic battery on its efficiency. In E3S Web of conferences (Vol. 216, p. 01149). EDP Sciences.

9. Kurbanov, A., Khasanov, M., Suyarov, A., Jalilov, U., Narimonov, B., & Boliev, A. (2021). An Appropriate Wind Model for The Reliability Assessment of Incorporated Wind Power in Power Generation System. In E3S Web of Conferences (Vol. 264, p. 04083). EDP Sciences.

10. Hasanov, M., Boliev, A., Suyarov, A., Urinboy, J., & Jumanov, A. (2020, April). Optimal Integration of Wind Turbine Based Dg Units in Distribution System Considering Uncertainties. In Khasanov, Mansur, et al." Rider Optimization Algorithm for Optimal DG Allocation in Radial Distribution Network." 2020 2nd International Conference on Smart Power & Internet Energy Systems (SPIES). IEEE (pp. 157-159).

УДК 621.31

ФОРМУВАННЯ ЕФЕКТИВНИХ РЕЖИМІВ МАЛИХ ГЕС І ГАЕС ЗАСОБАМИ КОМПЛЕКСНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЇХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ

О. М. Попович[1], І. В. Головань[2]

[1, 2]Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143,
[1, 2]Інститут електродинаміки НАН України, просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: popovich1955@ukr.net

Робота присвячена розробці й використанню засобів комплексного аналізу режимів ГЕС: критеріїв ефективності, математичних моделей та їх програмної реалізації на прикладі малої ГЕС.

Ключові слова: *електромеханічні системи, гідравлічні електричні станції, комплексні математичні моделі та критерії.*

FORMATION OF EFFECTIVE MODES OF SMALL GES AND GAES BY MEANS OF COMPLEX STUDY OF THEIR ELECTROMECHANICAL SYSTEMS

O. Popovych[1], I. Golovan[2]

[1, 2]Institute of Electrodynamics, National Academy of Science of Ukraine, 56 Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03057, e-mail: popovich1955@ukr.net
[1, 2]Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine, Metrolohichna street., 50 Kyiv, Ukraine, 03143

The paper is devoted to the development and use of tools for complex analysis of hydropower plant modes: efficiency criteria, mathematical models and their software implementation on the example of a small hydropower plant.

Keywords: *electromechanical systems, hydraulic power plants, complex mathematical models and criteria.*

ORCID: [1]0000-0002-9238-5782; [2]0000-0002-5250-6981

Оцінка ефективності гідротехнічних комплексів ГЕС і ГАЕС потрібна для обґрунтування доцільності їх створення і для формування оптимальних режимів роботи. Першим кроком такої оцінки є визначення комплексних критеріїв ефективності [1], які є співвідношенням обсягів виробленого корисного продукту і спожитого ресурсу. Розробку і використання засобів комплексного аналізу режимів малої ГЕС виконано у роботах [2, 3]. При цьому розроблено комплексну математичну модель малої гідроелектростанції, яка складається з імітаційних математичних моделей: гідравлічної турбіни з регульованим напрямним апаратом, її гідравлічної мережі, електромеханічної системи, моделі водосховища. Дані імітаційні моделі побудовано на основі диференціальних рівнянь електричної, механічної, гідравлічної рівноваги й призначено для визначення величин струмів, швидкостей, продуктивності усталених режимів роботи з урахуванням нелінійних властивостей параметрів рівнянь. Інформація про розраховані величини параметрів робочих режимів забезпечує визначення величини показників ефективності системи гідроелектростанції за різних умов роботи. За інформацією про величину природного стоку і характеристики турбінного агрегату визначено сталий рівень статичного напору, який забезпечує максимум виробленої електроенергії. Досліджено маневровий режим роботи електростанції з визначенням впливу зміни кількості одночасно працюючих агрегатів на величину виробленої електроенергії та зміну її потужності (показано можливість зменшення нерівномірності генерованої потужності практично у два рази і збільшення мінімальної потужності на 30 %). У порівнянні зі сталим стоком маневровий режим забезпечує майже двократне збільшення вироблення електроенергії й трикратне збільшення ефективності з урахуванням диференційованої за часом доби вартості електроенергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Popovych O. M., Golovan I. V. Complex design tools for improvement of electromechanical systems with induction motors. Tekhnichna Elektrodynamika. 2022. No. 2. Pp. 52–59. DOI:10.15407/techned2022.02.052
2. Попович О. М., Головань І. В. Імітаційна модель гідротурбіни для комплексного моделювання електромеханічної системи ГЕС. Відновлювана енергетика. 2023. № 2. С. 51–60. DOI:10.36296/1819-8058.2023.2(73)51-60.
3. Попович О. М., Головань І. В. Дослідження енергетичної ефективності електромеханічної системи малих гес у маневрових режимах роботи засобами комплексного моделювання. Відновлювана енергетика. 2024. № 3. С. 122–131. DOI: 10.36296/1819-8058.2024.3(78).122-131.

DEVELOPMENT OF A NEW HYDRO-MICROTURBINE THROUGH MODELING AND DETERMINING ITS OUTPUT PARAMETERS

Tokhirjon Abdulazizov[1], Navruzbek Mirzaalimov[1], Murodjon Abduvohidov[1], Avazbek Mirzaalimov[2], Jamshidbek Qakhkhorov[1], Boburjon Rashidov[1]

[1]Andijan State University, 129 University Str., Andijan, Uzbekistan, 170100
[2]Andijan State Pedagogical Institute, 4 Dostlik St., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (998) 91-614-32-01, e-mail: toxirjonbotirovich@gmail.com

This research focuses on improving the efficiency of microturbines by creating 3D models, printing the energy device using a 3D printer, and testing and measuring their characteristics. To analyze the technical characteristics of the turbines, digital modeling methods using SolidWorks and COMSOL Multiphysics software were employed. A model of the hydroturbine was developed, and measurements were taken considering parameters such as temperature, pressure, and flow velocity. The newly developed microturbine was found to have 1.12 times higher output power compared to prototypes in the industry.

Key words: *micro hydroturbine, 3D model, digital modeling, energy, efficiency.*

ORCID: [1]0009-0003-9469-3919; [2]0000-0002-9264-3710

Introduction

In modern energy systems, there is an increasing demand for small-scale energy production devices, particularly microturbines. Microturbines are designed to achieve high efficiency in a compact form and provide economically viable solutions for industrial and residential needs [1-3]. They enable energy production with minimal resource consumption, which has a significant impact on environmental cleanliness and energy efficiency [4-6]. One of the main advantages of microturbines is their ability to operate with high efficiency even at low power levels [7-9]. At the same time, testing microturbines and measuring their key characteristics is both scientifically and practically relevant, as these processes ensure the optimal operation of the device and provide an opportunity to improve the design.

The goal of this research is to develop a special device for testing microturbines and accurately and reliably measuring their efficiency. Furthermore, this device will be used to assess the performance, operational parameters, and energy production capacity of microturbines.

Methods and materials

The research utilized SolidWorks and COMSOL Multiphysics software to create 3D models of the microturbines and perform their testing. The geometric model of the microturbine was created using SolidWorks, and the fluid flow simulation was carried out through COMSOL Multiphysics. The microturbine modeling process consists of the following stages:

1. Creating the 3D model: The geometric model of the microturbine was created in SolidWorks, and then imported into COMSOL Multiphysics using the "LiveLink for SolidWorks" function.
2. Simulation: In COMSOL Multiphysics, the characteristics of the fluid flow were determined through the "Fluid Flow" module, and the "Single-Phase Flow" option and "Turbulent Flow, k-e" interface were selected.
3. Experiment: The microturbine prototype was constructed using a 3D printer, and experimental tests were conducted. During the tests, the operational parameters of the microturbine, including output power, electrodynamic parameters, and efficiency coefficient, were measured.

Results

The experimental results obtained in the research were analyzed. According to the data, the flow rate (Q) was Q = 0.0000833 m^3/s, the volume of water collected for the experiment was 3 liters = 0.003 m^3, and the time taken to fill 3 liters of water was 36 seconds. Additionally, the inlet pressure (Pinlet) was 0.1 MPa (100,000 Pa), the outlet pressure (Poutlet) was 0.02 MPa (20,000 Pa), the fluid density (ρ) was 1000 kg/m^3, and the acceleration due to gravity (g) was 9.81 m/s^2. The pressure difference caused the turbine blades to rotate, resulting in an electrical power output (Pelektric) of 0.545 W. The photovoltaic parameters were found to be a voltage of U = 10.9 V and a current of 0.05 A.

In the COMSOL Multiphysics model, the number of microturbine blades was set to 22. The hydraulic pressure exerted by the water flow on each blade, along with the flow velocity, caused the turbine rotor to rotate. The 3D model of the microturbine was created in SolidWorks, and simulation results were obtained through COMSOL Multiphysics.

Regarding the experimental results, the pressure difference exerted by the water flow on the microturbine blades in a 15 mm diameter tube was 0.8 MPa. The electrodynamic parameters were as follows: voltage U = 10.9 V, current = 0.5 A, and

efficiency coefficient η = 81.8%. The output power of the microturbine was Pelektric = 5.45 W. Comparison results showed that the developed microturbine had 1.12 times higher output power compared to industrially produced prototypes.

When comparing the microturbine modeling and experimental results, the modeling error was found to be 1.5%.

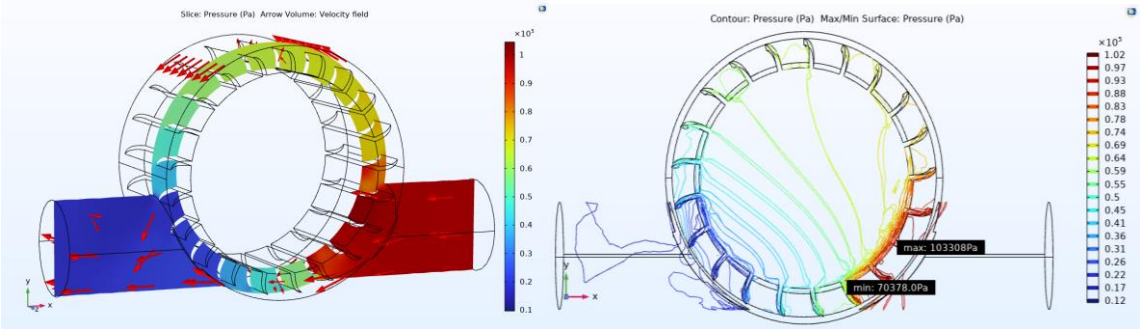


Fig. 1. Pressure difference gradient of the water affecting the turbine generator blade

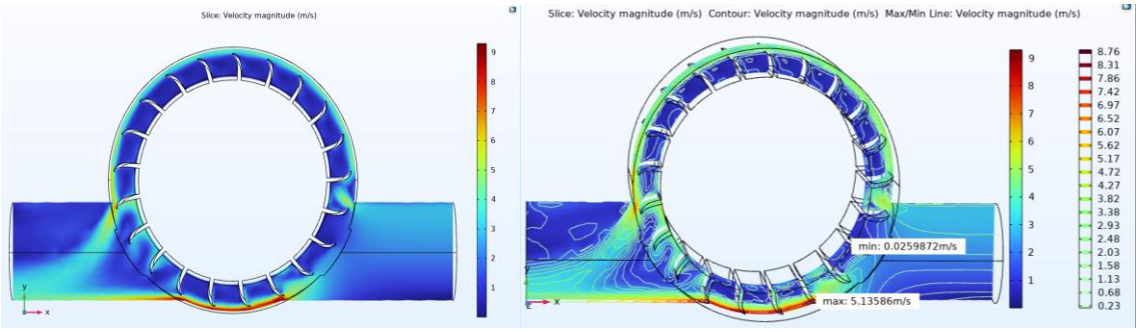


Fig. 2. The effect of the water flow velocity on the hydroturbine blades

Discussion

The results obtained in the research demonstrate new approaches aimed at improving the efficiency of microturbines. Through 3D modeling and simulation, the design and operational parameters of the microturbine were determined. The small error (1.5%) between the experimental and simulation results shows opportunities for further improvement of the microturbine design. It was understood that to achieve high efficiency, microturbines need to be aligned with energy efficiency and environmental cleanliness requirements.

Additionally, the comparison results showed that the developed microturbine has 1.12 times higher output power than industrially produced prototypes.

The research also provides a solid foundation for exploring the use of microturbines as an effective energy source for industrial and residential needs. The results confirm the role and importance of microturbines in energy conservation and ecological safety. In the future, it will be necessary to further develop these technologies and create new energy production systems based on them.

REFERENCES

1. Christopher M. White. Microturbines and Their Applications in Energy Systems. Renewable Energy Journal, 2015.
2. Ibrahim Dincer. Sustainable Energy Systems and Applications. Springer, 2011.
3. Tzu-Chen Hung. Integration of Renewable Energy Sources with Microturbines. Applied Energy, 2017.
4. David G. Wilson, Theo G. Moreton. Design of High-Efficiency Micro-Gas Turbines. Energy Conversion Journal, 2018.
5. Ali Yilmaz. Mini and Micro Hydropower Turbines: Design and Efficiency Improvement. Elsevier, 2020.
6. Zhang, Y., et al. CFD Analysis in Micro-Hydro Turbine Design. Journal of Computational Mechanics, 2020.
7. SolidWorks User Guide. 3D Modeling for Mechanical Design. Dassault Systèmes, 2023.
8. COMSOL Multiphysics User Manual. Multiphysics Simulation and Modelling. COMSOL AB, 2022.
9. Rowland, D., Smith, J. Emerging Distributed Power Technologies: Microturbines. Renewable Energy Systems Journal, 2001.

ELLIPTICAL HYDRAULIC TURBINE

Saidakhon Saidullayeva

Andijan State University,
129 University str., Andijan City, Uzbekistan,170100
phone: (93) 210-05-73, e-mail: saidasaydullayeva73@gmail.com

This paper describes the design and characteristics of an elliptical microturbine that can be used in water pipes.

Key words: *Spherical turbine, hydroturbine, elliptical turbine, jet turbine, irrigation system, microhydroelectric power station.*

ORCID: 0009-0005-8865-8521

The construction of a reaction hydraulic turbine is known [1,2]. The disadvantage of [1] was partially overcome in work [2], where the axis of rotation of the hydraulic turbine is positioned along the direction of the water flow in the pipe. Such a turbine design facilitates the creation of closed systems and can even be used in deep well pump designs. When creating pumps for pumping water, engines can be cooled by the same water flow. However, such a turbine design is expensive, and repairing it is complex and labor-intensive.

In the spherical turbine design [6], the blades are located near the inner wall of the pipe, where the speed of the water at these points is much lower than in the center. Additionally, the central transverse shaft creates resistance to the working substance flow, reducing the device's efficiency. To improve the efficiency of the turbine [3], an improved model of the spherical hydro turbine has been developed (Fig. 1). The proposed hydraulic turbine includes a cylindrical tube 1 for the working fluid flow, a vertical shaft 2 configured for mounting and rotating vertically along axis 3, perpendicular to the direction of the working substance flow. It also contains several curved blades 4 connected to shaft 2 extending radially outward from the central axis 3. The blades 4 are arranged mainly at equal intervals around the shaft, bent into an arc of approximately 180 degrees, and have an aerodynamic cross-section. The angle between each blade of the turbine and the central axis of the shaft is about 30 degrees. Unlike its analogs, in the proposed design, the vertical shaft 2 consists of two parts 2 and 2', each secured to the wall of the flow-through cylindrical tube 1 via bearings 5. Elliptically shaped aerodynamic blades with an average radial thickness x_L at mid-length are installed at a radial distance x_{01} from the inner wall of the tube so that the conditions $Lx_{01} = x_{02}$ and $x_{01} + x_L + x_{02} = R\text{-}r$ are satisfied,

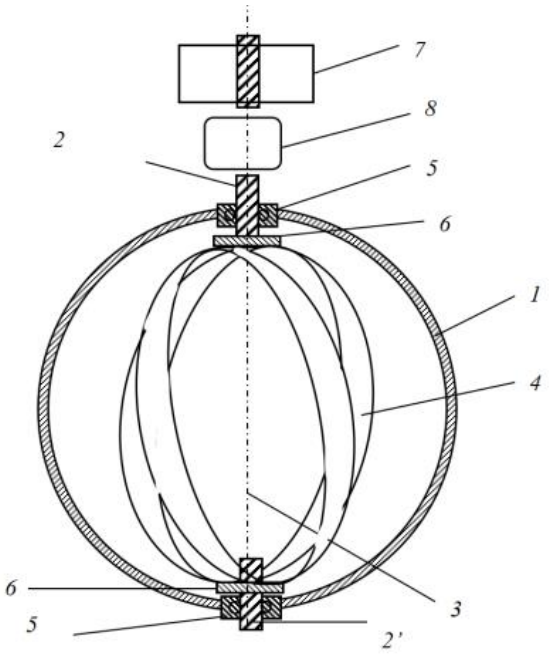


Fig. 1. Elliptical Hydraulic Turbine

Where,
X_{02} - is the distance from the blade to the center of the tube,
R - is the outer radius of the tube, and
r - is the radius of the shaft.

Compared to the spherical analogue, the proposed turbine design rotates at a higher speed (~31%) and generates ~18% more power than the analogue.

REFERENCES

1. Stausgaard, Carsten (DK-2880 Bagsværd, DK). Underground watermill. EP 2 673 498 B1. Date of publication and mention of the grant of the patent: 06.01.2016 Bulletin 2016/01.
2. Henry Obermeyer (Wellington CO). Hydromotive machines. Patent US No. 2014/0246859 A1. Patent Application Publication Sep. 4, 2014 Sheet 2 of 38.
3. Schlabach Rodrick A., Cosby Mark Ridell, Kurt Edward, Pallei Igor, Smith Greg. Hydroelectric energy system and turbine in pipe. Patent RU No. 2 526 604 C2. Published: 27.08.2014 Bulletin No. 24.

MICROHYDROTURBINE TEST SET

Saidakhan Saydullaeva[1], Oybek Bozarov[2]

Andijan Branch of Kokand University, Uzbekistan,
123 Boburshox street, Andijan city1
Andijan Technical Institute, Uzbekistan,
56 Boburshox street, Andijan city2
phone: (93) 210-05-73, e-mail: saidasaydullayeva73@gmail.com

This work describes the structure and characteristics of a small laboratory stand developed for determining the technical characteristics of micro-hydro turbines and studying hydraulic resistances.

Key words: *hydro turbine, micro Hydroelectric Power Plants, stand, hydraulic resistance, pressure*

ORCID: 0009-0005-8865-8521[1], 0009-0001-5093-2637[2]

It is known that to date, large and small hydroelectric power plants of the required capacity have been built in places where high pressure can be created in the territories of most countries. However, in many areas, there are areas where it is possible to create a water pressure of 2-5 meters. Micro HPP hydro turbines, which can be used in these water sources, differ from hydro turbines operating at high power and high pressures in their specific technical aspects, as well as in their structural design. In scientific research on the creation of new generations of micro-hydroturbines operating at such low pressures and the improvement of existing ones, special laboratory stands and devices are required for the experimental testing of hydroturbines. Currently, there are stands that allow assessing such parameters of hydroturbines as their efficiency at various water discharges and water pressures, the power supplied to the electric generator, the magnitude of cavitation, and energy losses due to local and hydraulic resistance in the device. However, most of these laboratory stands are very large, and one or two types of hydroturbines can be tested, while the possibilities of controlling water pressure and flow are limited. In other words, special research stands for testing various models of micro-hydro turbines have not been sufficiently developed. In such conditions, the preparation of a hydroturbine design for conducting experiments requires significant funds [1-3]. Therefore, a new laboratory stand and a methodology for conducting experiments have been developed, allowing for the verification of various parameters of small experimental models of various types of micro-hydroturbines. (Fig. 1).

The design of the developed laboratory stand is as follows: 1 is fixed to the upper base of the prefabricated frame with an aluminum-plastic panel installed in the upper part, and 3 reservoirs for a 100-liter water supply are installed in the lower part. 4 With the help of a pump, water is directed through supply pipe 18 to pipe 21 with a diameter D1=100 mm. From this main pipe, water is distributed in three directions - A, B, and C. In each direction, 7 meters and 6 manometers are installed for measuring water flow.

Water in branch “A” is distributed to pipes of three different diameters, each equipped with 8 control valves. In these canals, there is a possibility of reconnection of water flows. The length of the combined water pipe is equal to 10-12 pipe diameters, and a separate manometer 9 is installed to measure the pressure at the hydroturbine inlet of the combined flow. In the “B” direction, there are two pipes of different diameters, in which 9 manometers are also installed.

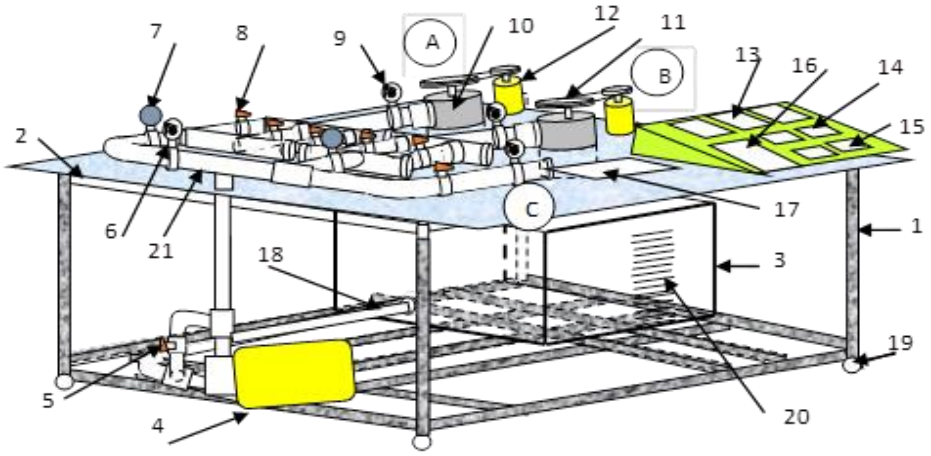


Figure 1. Stand for experimental testing of Pico hydroturbine models

Opportunities have been created for testing jet-type hydroturbines in both directions. In the “C” direction, it is planned to test hydroturbines of the active type, including Pelton and active water wheels, in which meters 7 for measuring water flow and manometers 9 for determining water pressure are installed. At the ends of all three branches, a special device for a hermetically sealed connection of the hydraulic turbine is attached. The water flow from the hydroturbine returns to the lower reservoir 3 and is pumped back to the hydroturbine. The rotational motion of the hydroturbine is transmitted through the pulleys 11 to the generator 12. The three-phase current from the generator passed through ammeters 13 and voltmeters installed for each phase to the automatic switch, then connected to the power outlet 16. For the purpose of controlling the amount and pressure of water flow, 5 valves are installed on a water pump with an electric motor with a power of 3 kW. This ensures the circulation of water drawn from the valve pump within the pump itself. With the help of a device that changes the frequency of the voltage supplied to the pump motor, it is possible to change the rotational speed of the motor rotor from 0 to 5000 per minute. The water flow rate of the pump supplying the hydroturbines can be changed in the range of 0-15 l/s, and the water pressure in the range of 0-100,000 Pa.

On this stand, it is possible to change local resistances by opening and closing the valves of the network in various combinations. It is possible to create various combinations of water discharge and pressure in any network. In parallel channels of different diameters, pressure losses in local resistances at bends, taps, and expansion and contraction points are determined based on the laws of fluid mechanics.

Figure 2. A stand prepared for experimental testing of Pico`s hydro turbine models

During the experiment, the water pressure in the networks was measured with RA, RV, and RS manometers, the volume of the water flow was determined according to the graduated scales in the vessel 3, and the rotational speed of the impeller was recorded using a tachometer.

This prepared laboratory stand has the possibility of using it in the process of teaching the laws of hydrodynamics. In particular, they can study the characteristics of turbulent and laminar flow, the nature and properties of local resistances in such phenomena as turning, expansion of the flow channel, and narrowing.

The advantage of this experimental stand is that it is much cheaper than existing solutions and allows for the manufacture of small models of various types of hydraulic turbines and their testing at any pressure up to 1 atmosphere with a water flow rate of 1-15 liters/second. Also, based on the theory of similarity, it is possible to create a large-scale prototype of an experimental model of a hydro turbine. Moreover, this stand can be widely used in laboratory conditions for studying the laws of hydrodynamics, hydropower, hydraulics, and analysis of ground resistances.

REFERENCES:

1. V.Obretenov, T.Tsalov, Stand for Testing of Hydrokinetic Turbines. https://www.researchgate.net/publication/267510438.
2. R.Pokhrel, B.Bhandari, Testing and development of Pico hydro turbines, International Journal on Hydropower and Dams - January 2005. https://www.researchgate.net/publication/285685947
3. S.Arad, L.Samoila, I.Sardaroiu, Laboratory stand with micro hydro generator, Annals of the University of Petrosani, Electrical Engineering, 22 (2020). https://www.upet.ro/annals/electrical/doc/2020/L13%/20Arad%20Susana.pdf

УДК 621.31, 621.548

ЕФЕКТИВНЕ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ГРАВІТАЦІЙНОГО АКУМУЛЮВАННЯ В КОМПЛЕКСІ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ МАЛИХ ГЕС І ГАЕС

Л. К. Лістовщик[1], П. П. Мирутенко[2], О. М. Попович[3]

[1, 2]Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна, тел.: (044)204-82-25, e-mail: le_on@ukr.net
[3]Інститут електродинаміки НАН України, просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: popovich1955@ukr.net
[3]Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143

Розглянуто можливості збільшення ефективності ГЕС і ГАЕС вдосконаленням систем підйому води у водосховище в умовах змінної потужності потоку енергії на вході системи.

Ключові слова: *гравітаційне акумулювання енергії, електромеханічні системи водопідйому, змінна потужність потоку енергії.*

EFFECTIVE APPLICATION OF GRAVITY STORAGE SYSTEMS IN THE COMPLEX OF ELECTROMECHANICAL EQUIPMENT OF SMALL GES AND GAES

L. Listovshcyk[1], P. Myrutenko[2], O. Popovych[3]

[1, 2]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute" 37 Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03056, e-mail: le_on@ukr.net
[3]Institute of Electrodynamics, National Academy of Science of Ukraine, 56 Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03057, e-mail: popovich1955@ukr.net
[3]Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine, Metrolohichna street., 50 Kyiv, Ukraine, 03143
The article considers the possibilities of increasing the efficiency of GES and GAES by improving the systems of water lifting into the reservoir under conditions of variable power flow at the system inlet.

Keywords: *gravitational energy storage, electromechanical water-lifting systems, variable power of energy flow.*

ORCID: [1]0000-0003-3413-1802; [2]0000-0002-7960-0687; [3]0000-0002-9238-5782.

Основний цикл роботи ГЕС і ГАЕС як об'єктів енергетики пов'язаний з накопиченням у водосховищі запасу потенціальної (гравітаційної) енергії води для наступного перетворення її на електричну. Енергетична ефективність такого робочого циклу визначається співвідношенням різниці виробленої й спожитої (комплексом власного електромеханічного обладнання) електричної енергії з обсягом енергетичного ресурсу на вході системи. Ефективність використання капітальних вкладень у спорудження системи визначається їх співвідношенням з вартістю виробленої електричної енергії протягом часу експлуатації. Ефективна робота потребує збільшення як енергоефективності власного обладнання, так і середньої за цикл потужності генерування.

Ця робота присвячена пошуку можливості збільшення ефективності ГЕС і ГАЕС вдосконаленням систем накопичення води у водосховищі в умовах змінної потужності потоку енергії на вході системи, як у режимі ГАЕС, так і під час роботи ГЕС у комплексі з сонячними або вітроелектростанціями. Проблематика ефективної роботи цих систем обумовлена розбіжністю змінної поточної величини потужності первинного потоку енергії й оптимальної потужності ЕМС водопідйому. Для найпоширеніших систем водопідйому, на основі відцентрових насосів, умови економічної роботи обмежують допустиму зміну продуктивності (відповідно й потужності) у робочому діапазоні, за межами якого ККД інтенсивно знижується до нуля. Засоби частотного регулювання не дозволяють істотно розширити межі робочого діапазону, оскільки напір насоса знижується пропорційно квадрату швидкості й швидко стає меншим за потрібну висоту підйому води. З огляду на вказані чинники на практиці часто застосовують дискретне регулювання кількості паралельно працюючих насосних агрегатів підйому води. Це заважає ефективній роботі, якщо потужності менші, ніж на початку робочого діапазону відцентрового насоса, і є особливо істотними в разі використання енергії відновлюваних джерел.

Для ефективного використання енергії первинного джерела для водопідйому на всьому діапазоні зміни вхідної потужності досліджено можливість застосування проміжних гравітаційних акумуляторів енергії на основі підйомних установок з частотним регулюванням [1, 2]. У цьому разі відповідно до величини вхідної потужності змінюється швидкість підйому маси гравітаційного акумулятора й потужність накопичення потенціальної енергії. Після завершення підйому ця енергія використовується для підйому води з оптимальною потужністю. Особливостями такої

схеми є циклічний режим роботи і збільшення етапів перетворення енергії первинного джерела. Таких недоліків можна позбутися застосуванням електромеханічних систем водопідйому з нагнітачами об'ємної дії.

Одним з прикладів застосуваня нагнітачів об'ємної дії є вітроелектрична гідроакумулювальна станція [3] (рис. 1), що містить нижній резервуар 1, верхній резервуар 2, накопичена вода з якого надходить в турбінний гідроелектричний агрегат 3, а з нижнього резервуара 1 у верхній резервуар 2 воду подають за допомогою нагнітача об'ємної дії 4. Живлення одного або декількох двигунів 5 нагнітача об'ємної дії 4 відбувається від вітрогенераторів 6 через частотний перетворювач 7 із системою регулювання відповідно до поточної потужності вітрогенераторів. За наявності вітру електричну енергію, що згенерована вітрогенераторами 6, через частотний перетворювач 7 подають на електродвигуни 5 нагнітача об'ємної дії 4.

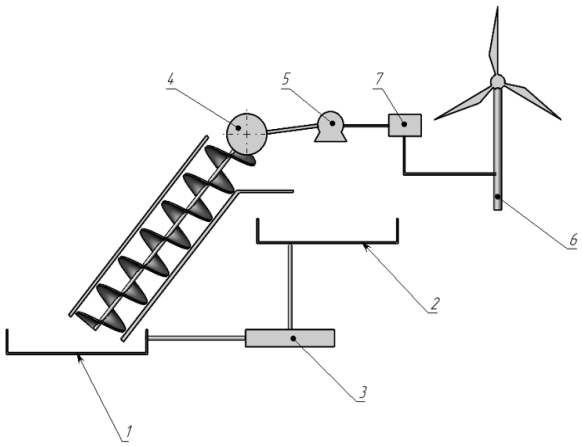


Рис. 1. Вітроелектрична гідроакумулювальна станція

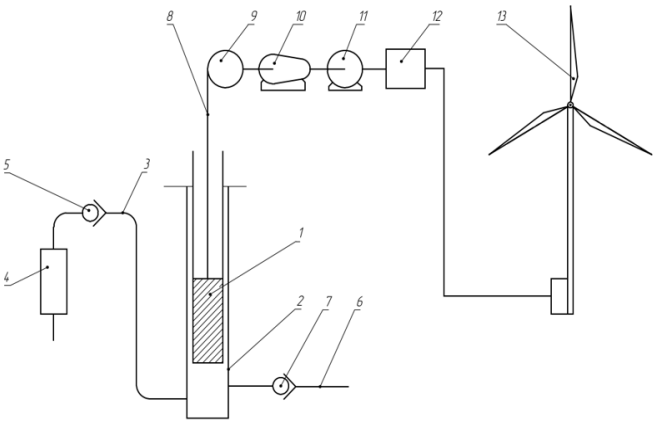


Рис. 2. Система з гравітаційним накопичувачем енергії

Нагнітач об'ємної дії 4 починає подавати воду з нижнього резервуара 1 у верхній резервуар 2. За наявності достатньої кількості води у верхньому резервуарі 2 та необхідності в додатковій електричній потужності для споживачів воду з верхнього резервуара 2 подають в турбінний гідроелектричний агрегат 3 і далі – в нижній резервуар 1. При цьому швидкість руху води в нагнітачі об'ємної дії варіюється в широких межах і залежить від швидкості вітру.

Іншим прикладом є система з гравітаційним накопичувачем енергії, вода у якій із резервуара періодично витісняється масивним поршнем (рис. 2), конструкція якого містить гравітаційний поршень 1, вертикальний циліндр 2, трубу для відведення води 3, що з'єднана з турбіною 4 через зворотний клапан 5, трубу для підведення води 6 через зворотний клапан 7, частотний перетворювач 12, який під'єднаний до електричного двигуна 11 та через редуктор 10 до барабана 9, на який намотується (або змотується) канат 8. Живлення двигуна 11 відбувається від вітрогенераторів 13 через частотний перетворювач 12 із системою регулювання відповідно до поточної потужності. За наявності вітру електричну енергію, що згенерована вітрогенераторами 13, через частотний перетворювач 12 подають на електродвигун 11. Під'єднаний до вала редуктора 10 барабан 9 починає намотувати канат 8, піднімаючи гравітаційний поршень 1. Вода через трубу для підведення води 6 та зворотній клапан 7, надходить до вертикального циліндра 2 і заповнює його. За наявності достатньої кількості води у вертикальному циліндрі 2 та необхідності в додатковій електричній потужності для споживачів канат 8 починають змотувати з барабана 9, гравітаційний поршень 1 починає витісняти воду з вертикального циліндра 2, вода своєю чергою через трубу для відведення води 3 надходить у турбіну 4, генеруючи електричну енергію. При цьому швидкість запасання потенціальної енергії в системі варіюється в широких межах і залежить від швидкості вітру.

ПОСИЛАННЯ

1. O. Popovych, I. Golovan, S. Shevchuk and L. Listovshchyk, "Means of Complex Design of the Electromechanical System of the Gravity Energy Storage of the WindPower Plant," 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), 2022, pp. 149–152. doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969243.

2. Пат. на корисну модель 152220 Україна, МПК (2006) F03G 3/00. Електромеханічна система акумулювання гравітаційної енергії / О .М.Попович, Л. К.Лістовщик, П. П.Мирутенко, Б. А.Бушинський; заявл. 25.07.2022; опубл. 09.11.2022, Бюл. № 45.

3. Пат. на корисну модель 158259 Україна, МПК (2006) F03G3/00, F03D9/10. Гідроакумулююча вітроелектрична станція / О. М.Попович, Л. К.Лістовщик, П. П.Мирутенко; заявл. 19.03.2024; опубл. 15.01.2025, Бюл. № 3/2025.

УДК 628.165

РЕТРОСПЕКТИВНИЙ АНАЛІЗ РОЗВИТКУ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ

П. Ф. Васько[1], В. А. Рибальченко[2]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (067) 320-34-90, e-mail: ivevasko@gmail.com

Розглянуто результати реалізації основних промислових технологій опріснення морської та солонуватої води, визначено ретроспективні тренди обсягів виробництва опрісненої води, сучасний стан ринку капіталу опріснення й темпи його зростання, основних учасників ринку обладнання і проєктних рішень опріснювальних заводів.

Ключові слова: *морська вода, обсяги виробництва, опріснення, технологія, ринок капіталу.*

RETROSPECTIVE ANALYSIS OF THE DEVELOPMENT OF INDUSTRIAL WATER DESALINATION TECHNOLOGIES

P. Vasko[1], V. Rybalchenko[2]

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna Str., Kyiv, Ukraine, 03143,
phone: (067) 320-34-90, e-mail: ivevasko@gmail.com

The results of the implementation of the main industrial technologies for desalination of sea and brackish water are considered, retrospective trends in the production volumes of desalinated water, the current state of the desalination capital market and its growth rates, the main participants in the equipment market and design solutions for desalination plants are determined.

Keywords: *seawater, production volumes, desalination, technology, capital market.*

ORCID: 0000-0001-8807-7173[1], 0009-0009-3592-7897[2]

Опріснення являє собою процес видалення солі з води, незалежно від того, чи це морська вода, солонувата, або мінералізована [1]. На сьогодні для опріснення води в промислових масштабах широко застосовують термальну та мембранну технології. Процеси термічного знесолення в промислових масштабах засновані на зміні фаз стану солоної води, до яких належать багатостадійне швидке випаровування (MSF), багаторазова дистиляція (MED), дистиляція з механічним і термічним стисненням пари (MVC, TVC). Технології мембранного опріснення використовують мембрани для відділення прісної води від солоної живильної води. Живильна вода подається на поверхню мембрани, яка вибірково пропускає воду і не пропускає солі. Найбільшого поширення набули технології зворотного осмосу (RO) та електродіалізу (ED). Питомі витрати електроенергії для мембранного опріснення значною мірою залежать від концентрації солі в живильній воді. Питомі витрати електроенергії на ED менші, ніж на RO, за концентрації солей до 5000 проміле. Тому на цей час ED широко використовується для опріснення солонуватої води.

Основні тенденції та індикатори розвитку промислових технологій опріснення води досить повно висвітлені у звітах Міжнародного банку реконструкції та розвитку [2], авторитетної консалтингової фірми Fortune Business Insights™ [3], всесвітньої організації з дослідження ринку та консалтингу Polaris Market Research [4, 5]. Ретроспективний аналіз становлення та рангування промислових технологій опріснення до 2014 року наведено на рис. 1. На сьогодні введено в експлуатацію близько 21 000 опріснювальних заводів та установок, що продукують до 99 млн кубічних метрів прісної води щодня [6, 7]. Зокрема, в Європі в цей час продукується понад 9,2 млн кубометрів опрісненої води щодня, що становить близько 10 % загальної світової потужності. Розподіл сучасного світового ринку обсягів опріснення за технологіями наведено на рис. 2.

Згідно з дослідженнями Fortune Business Insights, у 2023 році розмір ринку опріснення становив 23,77 млрд дол. США. Очікується, що ринок зростатиме на 8,63 % щорічно і до 2032 року досягне 49,80 млрд дол. США. До основних учасників ринку опріснення можна віднести такі фірми та корпорації: Acciona, Ampac, Aquatech International LLC, Biwater Holdings Limited., BWT Holding GmbH, Cadagua, Degrémont, Doosan Heavy Industries & Construction Co., Ltd., DuPont, General

Electric Company, Genesis Water Technologies, Guangzhou KangYang Seawater Desalination Equipment Co., Ltd. (KYSEARO), IDE Technologies, Koch Separation Solutions (KSS), Lenntech, SUEZ, Veolia, Xylem [4, 5].

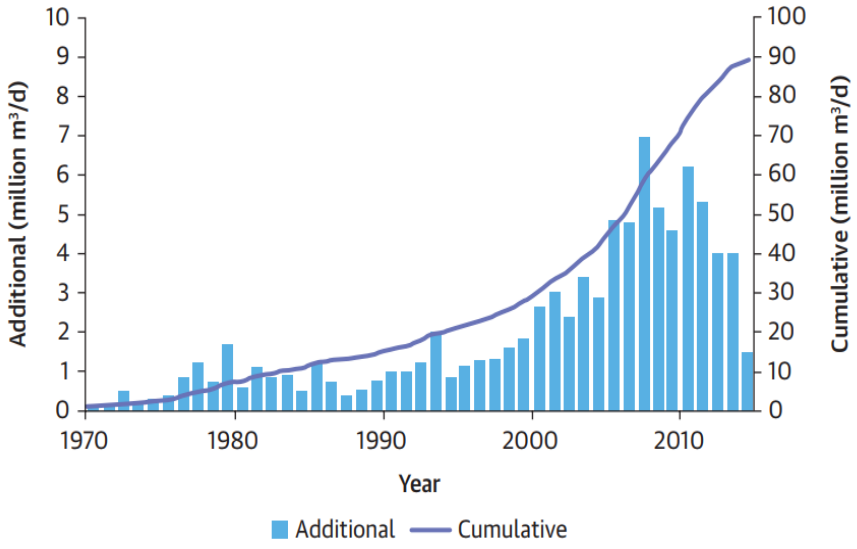


Рис. 1. Динаміка світового обсягу опріснення та його щорічного приросту [2]

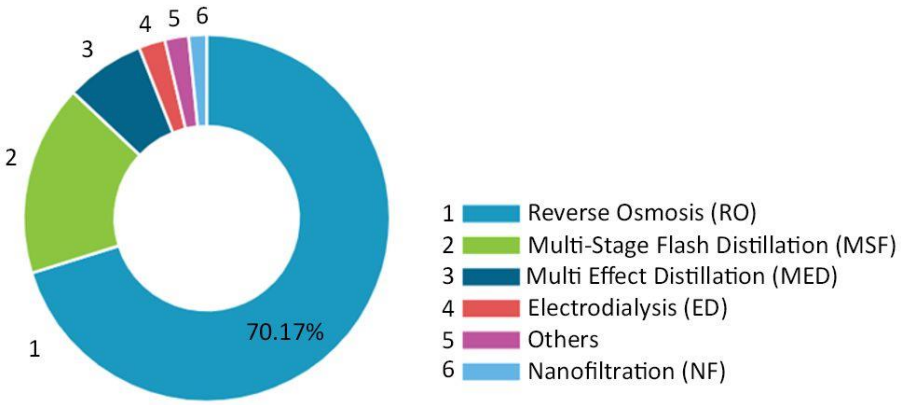


Рис. 2. Сучасний світовий ринок обсягів опріснення за технологіями, 2023 [3]

ПОСИЛАННЯ

1. Louis Theodore, R. Ryan Dupont. Introduction to Desalination: Principles, Processes, and Calculations. 2022. John Wiley & Sons. 512 p. ISBN: 978-1-119-69175-4.

2. The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. MARCH 2019. 97 p. https://documents1.worldbank.org/curated/zh/476041552622967264/pdf/135312-WP-PUBLIC-14-3-2019-12-3-35-W.pdf

3. Desalination Technologies Market Size, Share & Industry Analysis, By Technology Type (Multi Stage Flash Distillation (MSF), Multi-Effect Distillation (MED), Reverse Osmosis (RO), Electrodialysis (ED), Nanofiltration, and Others), By Source (Sea Water, Brackish Water, River Water, and Others), By End-User (Municipal, Industrial, and Power Generation), and Regional Forecast, 2024–2032. September 02, 2024. Report ID: FBI10980. https://www.fortunebusinessinsights.com/desalination-technologies-market-109806 [Accessed – September.21.2024].

4. Desalination Technologies Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Technology (Reverse Osmosis, Multi-Stage Flash, Multi-Effect Distillation); By Application; By Region; Segment Forecast, 202– 2032. Jan-2024.

Report ID: PM3930. https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/desalination-technologies-market/request-for-sample.

5. Water Desalination Equipment Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report, By Technology; By Application (Municipal, Industrial, Others) By Source. (Sea Water, Brackish Water, River Water, Others); By Region; Segment Forecast, 2022-2030. Jun-2022. Report ID: PM1986. https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/water-desalination-equipment-market/toc.
6. Marc-Antoine Eyl-Mazzega and Élise Cassignol, “The Geopolitics of Seawater Desalination”, Études de l’Ifri, Ifri, September 2022. 30 p.
7. Distribution of desalination capacity worldwide in 2022, by region. https://www.statista.com/statistics/1379757/global-water-desalination-capacity-share-by-region/.

УДК 628.165

ПИТОМА ВАРТІСТЬ ПРОМИСЛОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОПРІСНЕННЯ МОРСЬКОЇ ВОДИ

А. О. Бриль

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул.Метрологічна, 50, Київ, 03143,Україна,
тел.: (067) 507-22-12, e-mail: A_Bryl@i.ua

Виконано аналіз питомої вартості виробництва опрісненої морської води з використанням промислових термічних та мембранних технологій.

Ключові слова: *енергія, завод, морська вода, обсяг виробництва, опріснення, питома вартість, технологія.*

SPECIFIC COST OF INDUSTRIAL SEAWATER DESALINATION TECHNOLOGIES

A. Bryl

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna Str., Kyiv, Ukraine,03143,
phone: (067) 507-22-12, e-mail: A_Bryl@i.ua

An analysis of the specific cost of producing desalinated seawater using industrial thermal and membrane technologies was performed.

Keywords: *energy, plant, seawater, production volume, desalination, specific cost, technology.*

ORCID: *0000-0002-5134-0393*

На сьогодні для опріснення морської води в промислових масштабах широко застосовуються термальна та мембранна технології [1–5]. Сутність термальної технології полягає в тому, що солону воду нагрівають і випаровують (технологія MSF). Вихідну пару збирають та конденсують, утворюється прісна вода, звана дистилятом. Випарювати воду можна як у прцесі кипіння, так і без кипіння. В останньому разі воду нагрівають за більшого тиску, ніж тиск в камері випаровування, куди подається вода (технологія MED).

Технології мембранного опріснення використовують мембрани для відділення прісної води від солоної живильної води. Для опріснення морської води в промислових масштабах використовується технологія зворотного осмосу (SWRO), що ґрунтується на принципі проникнення молекул води через напівпроникну мембрану під дією гідростатичного тиску, який створюється гідронасосами з приводом від електричних двигунів зі споживанням електроенергії.

Виробництво прісної води з моря стало обов'язковим для багатьох економік світу. Станом на 2023 рік введено в експлуатацію близько 21 000 опріснювальних заводів та установок, здатних продукувати до 99 млн кубічних метрів прісної води щодня [6, 7]. Ці заводи є стратегічними не лише для повсякденного життя людей, але і для промислової діяльності. У країнах Близького Сходу споруджено найбільші в світі опріснювальні заводи.

Аналіз питомих витрат коштів на виробництво опрісненої води залежно від технології та місця розташування заводу наведено у звіті Міжнародного банку реконструкції та розвитку й висвітлено в таблиці. Отримані результати ґрунтуються на дослідженні показників понад 50 опріснювальних проєктів у всьому світі, реалізованих протягом останніх двох десятиліть до 2016 року.

У переважній більшості випадків технологія MSF використовується як складова об'єднаного проєкту водопостачання та електроенергії, коли утилізується теплова енергія електростанції. Питома вартість опрісненої води значною мірою визначається масштабом виробництва і становить 1,02–1,74 дол. США за кубічний метр. За меншої потужності заводу опріснена вода коштує дорожче. Тому потужні заводи MSF виявилися конкурентоспроможними з MED, а в окремих випадках – з SWRO. Після 2020 року побудовано новітні опріснювальні заводи значної потужності, на яких досягнуто рекордних показників продуктивності промислових технологій: MSF–- 1 938 000 м^3 на добу, MED – 800 000 м^3 на добу, SWRO – 909 201 м^3 на добу за ціною прісної води близько 0,5 дол. США за м^3. Тренд зміни вартості опрісненої води в процесі реалізації промислових технологій наведено на рисунку.

Капіталоємність проєкту опріснення, експлуатація і технічне обслуговування (O&M) та загальні витрати на виробництво води залежать також від виду джерела енергії й ціни на енергоносії. Заводи MSF більш капіталомісткі, ніж заводи SWRO, для яких витрати на відновлення капіталу за 25-річний термін експлуатації з 5-відсотковою ставкою можуть становити майже половину собівартості виробництва води. Проте поточні витрати для заводів SWRO на

одиницю продукції вдвічі більші, ніж на заводах MSF, і майже втричі більші, ніж у MED. Значну складову вартості опрісненої води становлять також витрати на енергію.

Таблиця. Узагальнені питомі витрати на опріснення морської води [8]

Desalination method		Capital costs (million US$/MLD)		O&M costs (US$/m³)		Cost of water production (US$m³)	
		Range	Average	Range	Average	Range	Average
MSF		1.7-3.1	2.1	0.22-0.30	0.26	1.02-1.74	1.44
MED-TVC		1.2-2.3	1.4	0.11-0.25	0.14	1.12-1.50	1.39
SWRO Mediterranean Sea		0.8-2.2	1.2	0.25-0.74	0.35	0.64-1.62	0.98
SWRO Arabian Gulf		1.2-1.8	1.5	0.36-1.01	0.64	0.96-1.92	1.35
SWRO Red Sea		1.2-2.3	1.5	0.41-0.96	0.51	1.14-1.70	1.38
SWRO Atlantic and Pacific oceans		1.3-7.6	4.1	0.17-0.41	0.21	0.88-2.86	1.82
Hybrid	MSF/MED	1.5-2.2	1.8	0.14-0.25	0.23	0.95-1.37	1.15
	SWRO	1.2-2.4	1.3	0.29-0.44	0.35	0.85-1.12	1.03

Note: Costs are at 2016 values. MED-TVC = multiple effect distillation with thermal vapor compression; MLD = million liters per day; MSF = multistage flash distillation; O&M = operation and maintenance; SWRO = seawater reverse osmosis.

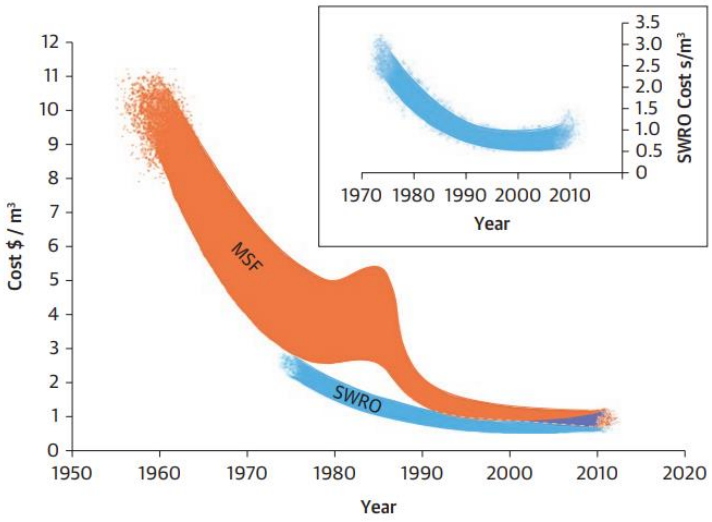


Рисунок. Тренд зміни вартості опрісненої води [8]

ПОСИЛАННЯ

1. Hisham T. El-Dessouky, Hisham M. Ettouney. Fundamentals of Salt Water Desalination, Elsevier, 2002, p. 670.
2. Lior, N. Advances in Water Desalination; Lior, N., Ed.; John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, USA, 2012. 712 p. ISBN 9781118347737.
3. Voutchkov *N.* Desalination Engineering: Planning and Design. 2019. Taylor & Francis Group, LLC. 249 p.
4. Louis Theodore, R. Ryan Dupont. Introduction to Desalination: Principles, Processes, and Calculations. 2022. John Wiley & Sons. 512 p. ISBN: 978-1-119-69175-4.
5. Kucera J. Reverse Osmosis. 3rd Edition. Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons. 2023. 671 p.
6. Marc-Antoine Eyl-Mazzega and Élise Cassignol, "The Geopolitics of Seawater Desalination", Études de l'Ifri, Ifri, September 2022. 30 p.
7. Distribution of desalination capacity worldwide in 2022, by region. https://www.statista.com/statistics/1379757/global-water-desalination-capacity-share-by-region/ [Дата звернення – 14.08.2024].
8. The Role of Desalination in an Increasingly Water-Scarce World. International Bank for Reconstruction and Development / The World Bank. MARCH 2019. 97 p. https://documents1.worldbank.org/curated/zh/476041552622967264/pdf/135312-WP-PUBLIC-14-3-2019-12-3-35-W.pdf

УДК 621.311.24: 621.548: 628.165

ВИЗНАЧЕННЯ ЕКСТРЕМУМУ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ ЗА ЗМІННИХ ЗНАЧЕНЬ ШВИДКОСТІ ВІТРУ ТА ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ

П. Ф. Васько

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (067) 320-34-90, e-mail: ivevasko@gmail.com

Розглянуто сукупність математичних методів для визначення параметрів екстремального значення потужності вітроелектричних установок зі змінною частотою обертання в діапазоні зміни робочих швидкостей вітру.

Ключові слова: *вітроелектрична установка, екстремум, метод, потужність, частота обертання, швидкість вітру.*

DETERMINATION OF THE EXTREME POWER OF A WIND POWER PLANT AS AN ENERGY SOURCE FOR WATER DESALINATION UNDER VARIABLE WIND SPEED AND SPEED OF ROTATION VALUES

P. Vasko

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna Str., Kyiv, Ukraine, 03143,
phone: (067) 320-34-90, e-mail: ivevasko@gmail.com

A set of mathematical methods for determining the parameters of the extreme value of the power of wind power plants with a variable rotation speed in the range of changes in operating wind speeds is considered.

Keywords: *wind power plant, extremum, method, power, rotation speed, wind speed.*

ORCID: 0000-0001-8807-7173

Для інтеграції енергії вітру в технологічні схеми опріснення води будемо орієнтуватись на використання вітроелектричних установок (ВЕУ) та станцій, що можуть функціонувати зі змінною частотою обертання в діапазоні зміни швидкості вітру менше номінального значення. Режим роботи ВЕУ зі змінною частотою обертання надає можливості для збільшення енергоефективності установки в порівнянні з режимом сталої частоти обертання. Далі наведено обґрунтування цього положення. Сукупність функціональних залежностей генерованої потужності ВЕУ за різних фіксованих значень швидкості вітру та частоти обертання, розрахованих на основі теоретичних положень вітротехніки, наведено на рис. 1. Для узагальнення аналізу характеристики представлено у відносних одиницях стосовно номінальних значень потужності та частоти обертання в діапазоні зміни швидкості вітру від v_1 до $v_5 = v_{nom}$.

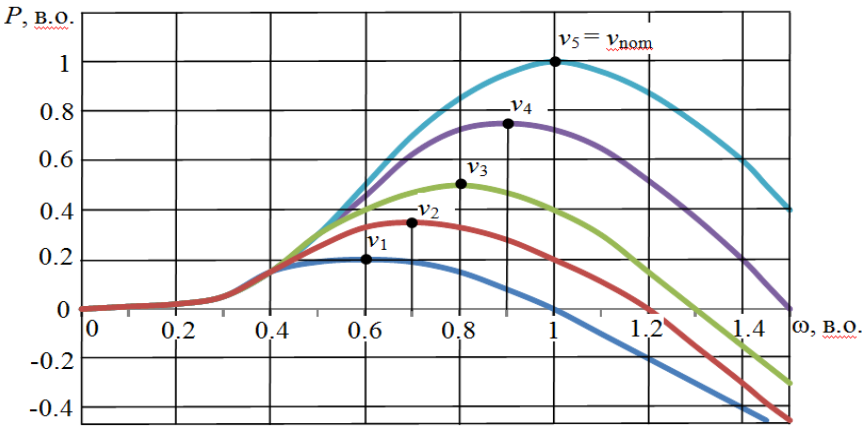


Рис. 1. Залежність генерованої потужності ВЕУ від частоти обертання та швидкості вітру

За сталої частоти обертання з номінальним значенням ω = 1,0 в.о. генерування потужності відбувається за початкової швидкості вітру v_1. Зі зростанням швидкості вітру від v_1 до $v_5 = v_{nom}$ генерована потужність також збільшується від нульового до номінального значення P= 1.0 в.о. Проте якщо надати можливості ВЕУ обертатися з іншою частотою, зокрема ω = 0,6 в.о., то вже за швидкості вітру v_1 генерована потужність становитиме 0,2 в.о. і характеризуватиме максимально можливе значення для цієї швидкості вітру. Аналогічна ситуація спостерігається і на інших швидкостях вітру до номінальної включно. Так, на швидкості вітру v_3 при зміні частоти обертання з ω = 1,0 в.о. на ω = 0,8 в.о. можна досягти збільшення генерованої потужності з P= ,.4 в.о. до P= 0,5 в.о. Таким чином, у діапазоні зміни швидкості вітру до номінального значення включно існує можливість досягти більшої енергоефективності ВЕУ зміною частоти обертання, яка повинна відповідати максимально можливій потужності. При швидкостях вітру більше номінального значення ВЕУ функціонує зі сталою частотою обертання ω = 1,0 в.о. Оскільки швидкість вітру являє собою незалежну величину, значення якої визначається метеорологічними умовами в місці розташування ВЕУ, то максимально можливої енергоефективності ВЕУ може бути досягнуто лише внаслідок впливу на частоту обертання.

Представлені на рис. 1 графічні залежності для ряду фіксованих значень швидкості вітру являють собою сукупність твірних неперервної поверхні з екстремумом, яка може бути описана гладкою двопараметричною функцією.

Для визначення екстремумів двопараметричних функцій розроблено значну кількість числових методів, які класифікуємо для цієї задачі в такий спосіб: методи на основі визначення похідної досліджуваної функції та методи з використанням інформації тільки про значення функції без визначення похідних.

Вихідне положення методів з визначенням похідної розлянемо на прикладі узагальненої диференційованої двопараметричної функції $z = f(x, y)$. Якщо у точці $M(x0, y0)$ функція z має екстремум, то її частинні похідні в цій точці рівні нулю. Для визначення максимуму (мінімуму) необхідно отримати кількісні значення других похідних в цій точці $A = f''_{xx}(x0, y0)$, $B = f''_{xy}(x0, y0)$, $C = f''_{yy}(x0, y0)$ та обчислити $\Delta = AC - B_2$. Якщо $\Delta > 0$ і $A > 0$, то функція $f(x0, y0)$ в точці $(x0, y0)$ має мінімум. Якщо $\Delta > 0$ і $A < 0$, то функція $f(x, y)$ у точці $(x0, y0)$ має максимум. Якщо $\Delta < 0$, то функція $f(x, y)$ у точці $(x0, y0)$ не має екстремума. Якщо Δ = 0, то екстремум може бути, а може й не бути, потрібні додаткові дослідження. До найуживаніших методів належать різні градієнтні методи, метод множників Лагранжа, субградієнтний метод.

Вихідні положення методів, в яких не застосовуються похідні функції, ґрунтуються на формування логічно простих процедур пошуку, які не використовують жодної іншої інформації, крім даних про значення функції в окремих точках. Для цієї задачі такі методи можна розділити на дві групи: детерміновані та методи випадкового пошуку. Ідея побудови детермінованих методів пошуку екстремуму функції полягає в почерговій зміні кожної складової вектора, доки не буде досягнуто найбільше значення функції. Так, для зазначеної вище узагальненої неперервної функції $z = f(x, y)$ локальний максимум існує в точці $M(x0, y0)$, якщо виконується нерівність $f(x, y) \le f(x0, y0)$. До популярних методів цієї групи можна віднести методи перебору, покоординатного спуску Гаусса – Зейделя, Хука – Дживса, Розенброка, Нелдера – Міда. Для реалізації пошуку задаються всі координати початкової точки та дискретність змінних. Потім обчислюється нове значення функції, і якщо воно більше за попереднє, то крок пошуку вважається успішним. В іншому разі необхідно повернутись назад, зробити крок у протилежному напрямку й перевірити значення функції. Після перебору всіх координат пошук закінчується знаходженням поточної базисної точки. Якщо задані зміни кроку не привели до покращення значення функції, то крок пошуку зменшується, доки не буде знайдено вдалий напрямок або похибка результату стане менше заданого значення. До модифікованих методів покоординатного спуску можна віднести також симплекс-метод та метод спряжених напрямків Пауелла.

Ідея методів випадкового пошуку екстремуму полягає в тому, що можуть бути вибрані різні напрямки й величини робочого кроку в процесі пошуку. Спочатку обчислення функції роблять в деякій початковій точці, після цього змінюють крок у випадковому напрямку, порівнюють значення функції, і якщо потрібно знайти максимум, то роблять наступний крок у напрямку зростання функції. Після цього роблять спробу в ще одній точці, і знову напрямок для кроку вибирають випадково. Якщо в усіх напрямках від деякої точки значення функції менше, ніж у цій точці, то, мабуть, вона близька до екстремуму. У цій ситуації доцільно розрахувати декілька невипадкових точок, щоб бути впевненим, що центр цієї області є екстремумом. Доцільно зазначити, що ефективність методів знижується на пологих поверхнях. До переваг випадкових методів можна віднести легкість автоматизації та можливість використання алгоритму самонавчання, який використовує інформацію з попередніх кроків для подальшого визначення найімовірнішого напрямку пошуку. Значного застосування набули методи прямої вибірки, групової вибірки зі зменшенням інтервалу, сліпого пошуку, штрафних функцій.

Вибір потрібного методу визначення екстремуму потужності ВЕУ залежить від масштабності проєкту опріснення, вимог до обчислювальних ресурсів та їхньої вартості.

УДК 621.311.24: 621.548: 628.165

АЛГОРИТМІЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПОШУКУ ЕКСТРЕМУМУ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕСІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЯК ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ

П. Ф. Васько[1], Б. А. Кромпляс[1, 2]

[1]Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна, e-mail: ivevasko@gmail.com

[2]Інститут електродинаміки НАН України, просп. Перемоги, 56, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: b_kromp@i.ua

Розглянуто інтегральні властивості найпоширеніших алгоритмів пошуку точки максимальної потужності автономних вітроелектричних установок та багатоагрегатних вітроелектростанцій за змінних значень частоти обертання та швидкості вітру в процесі експлуатації.

Ключові слова: *алгоритм, вітроелектрична установка, екстремум, потужність, частота обертання, швидкість вітру.*

ALGORITHMICAL IMPLEMENTATION OF SEARCHING FOR THE POWER EXTREME OF A WIND POWER PLANT DURING OPERATION AS AN ENERGY SOURCE FOR WATER DESALINATION

P. Vasko[1], B. Kromplyas[1, 2]

[1]Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 50 Metrolohichna Str., Kyiv, Ukraine, 03143, e-mail: ivevasko@gmail.com

[2]Institute of Electrodynamics, National Academy of Science of Ukraine, 56 Peremohy Ave., Kyiv, Ukraine, 03057, e-mail: b_kromp@i.ua

The integral properties of the most common algorithms for finding the maximum power point of autonomous wind power plants and multi-unit wind power plants with variable values of rotation frequency and wind speed during operation are considered.

Keywords: *algorithm, wind power plant, extremum, power, rotation speed, wind speed.*

ORCID: [1]0000-0001-8807-7173, [2]0000-0001-7164-8056

Технічна реалізація математичних методів визначення максимальних значень потужності вітроелектричної установки (ВЕУ) при зміні експлуатаційних параметрів (швидкості вітру, частоти обертання, навантаження) може здійснюватися за допомогою мікропроцесорних контролерів MPPT (maximum power point tracking, англ.). Вони мають різні схемо-технічні рішення та алгоритми пошуку точки максимальної потужності (ТМП) на енергетичній характеристиці ВЕУ. Узагальнене представлення умов та напрямів пошуку ТМП зображено на рис. 1.

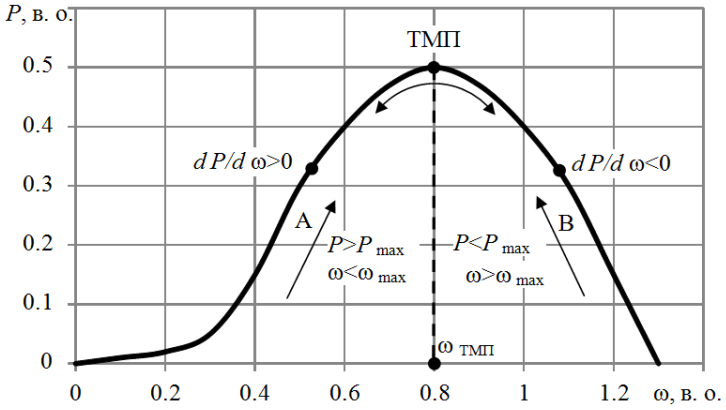


Рис. 1. Умови та напрями пошуку ТМП на енергетичної характеристиці ВЕУ за сталого значення швидкості вітру

Кожному з алгоритмів MPPT властиві свої переваги та недоліки, тому має місце також застосування комбінації окремих алгоритмів. Описи різних алгоритмів пошуку екстремуму опуклих двопараметричних функцій для MPPT

контролерів висвітлюються в багатьох публікаціях. З метою створення контролера для ВЕУ наведемо короткий огляд властивостей найпоширеніших алгоритмів МРРТ у відповідності до [1–7].

Спочатку розглянемо класичний алгоритм збурення та спостереження (P&O – Perturb and Observe, англ.), який починається з незначного збільшення або зменшення навантаження ВЕУ, що спонукає до зміни частоти обертання (ω). Якщо вихідна потужність установки збільшується при збільшенні ω, то алгоритм продовжує підвищувати ω, оскільки відбувається наближення до точки екстремуму. Якщо вихідна потужність падає після збільшення ω, то алгоритм зменшує ω, бо екстремум пройдено. Постійно вносячи ці невеликі коригування та спостерігаючи за вихідною потужністю, алгоритм P&O знаходить точку максимальної потужності й забезпечує роботу ВЕУ на максимальній продуктивності. Алгоритм P&O широко застосовують завдяки простоті його реалізації, проте через фіксований розмір кроку пошуку робоча точка коливається навколо екстремуму. Доволі значні коливання можуть відбуватися також при зміні швидкості вітру та навантаження.

Інтелектуальні алгоритми МРРТ використовують більш складні обчислювальні процедури для досягнення вищої ефективності та адаптивності порівняно з класичним алгоритмом. Вони включають елементи штучного інтелекту або штучних нейронних мереж (ANNs – Artificial Neural Networks, англ.) і завдяки машинному навчанню адаптуються до постійно мінливих характеристик ВЕУ через коливання швидкості вітру та навантаження. Завдяки процесу навчання ANNs враховують великі набори даних, що охоплюють різноманітні умови експлуатації й відповідні значення екстремумів. Шляхом ретельного аналізу цих шаблонів ANNs встановлює складні взаємозв’язки в даних. Ці нові знання дають змогу ANNs передбачати параметри екстремумів з винятковою точністю навіть за кардинальних змін умов експлуатації (зокрема, зупинка певної кількості ВЕУ в складі багатоагрегатної вітроелектростанції через відмови). Алгоритми з використанням нечіткої логіки також належать до групи інтелектуальних.

Сьогодні стрімко розвиваються оптимізаційні алгоритми МРРТ, які використовують стохастичні (випадкові) процеси для пошуку екстремуму. Вони імітують природні процеси поведінки рою комах (PSO), полювання вовків (GWO), еволюційні процеси (генетичні алгоритми GA) тощо. Оскільки обчислювальні ресурси контролерів стають доступнішими, існує перспектива широкого застосування цих алгоритмів під час створення автономних ВЕУ значної потужності. Для створення автономної баготоагрегатної вітроелектричної станції на основі сукупності ВЕУ становлять інтерес також прогнозувальні алгоритми, що їх застосовують у силовій електроніці та електромеханіці [8].

Під час вибору прийнятного алгоритму роботи МРРТ у конкретному випадку необхідно враховувати структуру побудови джерела енергії, вимоги технічного завдання до показників точності пошуку та можливості його схемотехнічної реалізації [9].

ПОСИЛАННЯ

1. Tella V. C., Agili B., He M. Advanced MPPT Control Algorithms: A Comparative Analysis of Conventional and Intelligent Techniques with Challenges. European Journal of Electrical Engineering and Computer Science. 2024. Vol. 8. No. 4. P. 6–20. https://doi.org/10.24018/ejece.2024.8.4.623.
2. Gupta N. et al. Review on Classical and Emerging Maximum Power Point Tracking Algorithms for Solar Photovoltaic Systems. JREE. 2024. Vol. 11, No. 2. P. 18–29. https://doi.org/10.30501/jree.2024.407775.1650
3. Marlin S., Jebaseelan S. A comprehensive comparative study on intelligence based optimization algorithms used for maximum power tracking in grid-PV systems. Sustainable Computing: Informatics and Systems. 2024. 41. 100946. doi.org/10.1016/j.suscom.2023.100946
4. Sarang S. A., Raza M. A., Panhwar M., Khan M., Abbas G., Touti E., Wijaya A. A. Maximizing solar power generation through conventional and digital MPPT techniques: a comparative analysis. Scientific Reports. 2024. 14(1). 8944. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59776-z
5. Hussain M. T., Sarwar A., Tariq M., Urooj S., BaQais A., Hossain M.A. An Evaluation of ANN Algorithm Performance for MPPT Energy Harvesting in Solar PV Systems. Sustainability. 2023. 15. 11144. https://doi.org/10.3390/su151411144
6. Rezk H.et al. Design and Hardware Implementation of New Adaptive Fuzzy Logic-Based MPPT Control Method for Photovoltaic Applications. IEEE Access. 2019. Vol. 7. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS.2019.2932694
7. Kumar A., Kumar D., Jarial S. K. A review on artificial bee colony algorithms and their applications to data clustering. Cybernetics and Information Technologies. 2017. 17(3). P. 3–28. https://doi.org/10.1515/cait-2017-0027
8. Yu Z., Long J. Review on Advanced Model Predictive Control Technologies for High-Power Converters and Industrial Drives. Electronics. 2024. 13. 4969. https://doi.org/10.3390/ electronics13244969
9. Mihnea Rosu-Hamzescu, Sergiu Oprea. Practical Guide to Implementing Solar Panel MPPT Algorithms. Microchip Technology Inc. AN1521. 2013. DS00001521A-page 16. https://ww1.microchip.com/downloads/en/appnotes/00001521a.pdf

УДК 621.3

ПЕРСПЕКТИВИ ПОШИРЕННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В УКРАЇНІ

Г. С. Трипольська[1], П. Градзюк[2], А. О. Семенюк[3], Р. З. Подолець[4], О. А. Дячук[5]

[1,3,4,5]Інститут економіки та прогнозування НАН України,
вул. П.Мирного, 26, м. Київ, 01011, Україна,
тел.: (096) 797-25-70, e-mail: g.trypolska@gmail.com
[2]Institute for Rural and Agricultural Development, Polsih Academy of Sciences
pgradziuk@irwirpan.waw.pl

Теплові насоси (ТН) стають перспективною технологією для декарбонізації теплопостачання в Україні, особливо в повоєнний період. Однак їхнє поширення залишається під питанням через високі капітальні витрати та брак фінансових стимулів. Використовуючи модель TIMES-Україна, було змодельовано п'ять сценаріїв для аналізу впливу різних факторів, зокрема капітальних витрат і доступності біомаси. Результати показують, що при обмеженій доступності біомаси зростає необхідність електрифікації та використання ТН. Проте ТН для централізованого теплопостачання стикаються з конкуренцією з боку біоенергетичних технологій, особливо когенераційних установок. Водночас індивідуальні ТН показують стабільне зростання у всіх секторах будівель.

Ключові слова: *теплові насоси, Україна.*

PROSPECTS FOR THE EXPANSION OF HEAT PUMPS IN UKRAINE

G. Trypolska[1], P. Gradziuk[2], A. Semeniuk[3], R. Podolets[4], O. Diachuk [5]

[1,3,4,5]Institute for Economics and Forecasting of the National Academy of Sciences of Ukraine,
26 P. Myrnogo str., Kyiv, Ukraine, 01011
phone: (096) 797-25-70, e-mail: g.trypolska@gmail.com
[2]Institute for Rural and Agricultural Development, Polsih Academy of Sciences
pgradziuk@irwirpan.waw.pl

Heat pumps (HPs) are becoming a promising technology for decarbonizing heat supply in Ukraine, especially in the post-war period. However, their widespread adoption remains uncertain due to high capital costs and a lack of financial incentives. Using the TIMES-Ukraine model, five scenarios were simulated to analyze the impact of various factors, including capital costs and biomass availability. The results show that with limited biomass availability, the need for electrification and the use of HPs increases. However, HPs for district heating face competition from bioenergy technologies, particularly cogeneration systems. At the same time, individual HPs demonstrate steady growth across all building sectors.

Key words: *heat pumps, Ukraine.*

ORCIDs: [1]0000-0002-8830-7036; [2]0000-0003-0825-6281; [3]0000-0003-2308-4713; [4]0000-0002-3276-5505; [5]0000-0002-3281-6536.

Теплові насоси (ТН) є перспективною енергетичною технологією, яка може посісти гідне місце у теплопостачанні повоєнної України. Теплові насоси є цікавим рішенням, значення якого посилюється з огляду на необхідність декарбонізації системи теплопостачання та будівель в цілому. Наразі теплові насоси є більш дорогою технологією, тож в умовах обмежених фінансових ресурсів за відсутності дієвих економічних стимулів поширення цієї технології не є гарантованим.

З використанням моделі TIMES-Україна [1] нами були змодельовані варіанти поширення теплових насосів. Ми змоделювали п’ять сценаріїв для різних груп чутливості: Сценарій № 1 – нижня оцінка капітальних витрат (CAPEX) для теплових насосів (ТН), Сценарій № 2 (базовий) – середня оцінка CAPEX для ТН, Сценарій № 3 – вища оцінка CAPEX для ТН, Сценарій № 4 – 50 % доступності потенціалу біомаси за замовчуванням та базовий CAPEX для ТН, Сценарій № 5 – 10 % доступності потенціалу біомаси за замовчуванням та базовий CAPEX для ТН. Результати показують значне зростання виробництва електроенергії та встановлених потужностей. У сценаріях чутливості до CAPEX (#1–3) різниця в динаміці є незначною, тоді як чутливість до біомаси демонструє на 11,4 та 26,5 % більше виробництво

електроенергії у сценаріях № 3 та № 4 відповідно порівняно з базовим сценарієм, а також на 6 та 8 % більше потужностей через дефіцит біомаси. Різниця в потужностях між сценаріями № 1–3 та № 4–5 зумовлена переважно введенням в експлуатацію нових великих ядерних реакторів (до 5,5 ГВт у сценарії № 4 та 20,7 ГВт у сценарії № 5), а також збільшенням кількості енергосховищ та офшорних ВЕС, оскільки економіка вимагає значно більше електроенергії через відсутність біомаси, а потенціали ВДЕ, які задаються екзогенно для кожного періоду, повністю використовуються у всіх сценаріях (85 ГВт сонячної енергії та 44 ГВт наземної вітроенергії). Малі модульні реактори потужністю 6,4 ГВт, що є екзогенною межею, з'являються в усіх сценаріях.

Дефіцит доступної біомаси може привести до зниження кінцевого енергоспоживання до 10 % у 2050 році порівняно зі сценаріями, де біомаса може вільно використовуватися, завдяки електрифікації та ширшим заходам з енергоефективності, включаючи ТН. У сценарії № 5 залишилося менше 1 млн т нафтового еквівалента викопного палива у кінцевому енергоспоживанні, а в сценарії № 2 – близько 2 млн т.

У секторі централізованого теплопостачання траєкторія для сценаріїв № 1–3 зростає приблизно на 12 % порівняно з 2020 роком, а у 2035 році спостерігаються незначні відхилення. У першій групі чутливості ТН для централізованого теплопостачання з’являються лише в сценарії № 1 з найнижчою оцінкою капітальних витрат, замінюючи частку теплогенераційних установок на біомасі, і досягають 7 % загального виробництва тепла. У двох інших сценаріях цієї групи суміш у централізованому теплопостачанні домінує біомасою, яка використовується у ТЕС та ТЕЦ. Друга група чутливості, навпаки, демонструє дуже різну динаміку, яка пояснюється для сценарію № 5 нижчим виробництвом на біомасі у 2025 році, швидким введенням в експлуатацію установок для централізованого теплопостачання на ТН у 2030–2040 роках і нижчим тепловим виробітком від газових ТЕЦ і ТЕ у 2050 році (які на той час працюватимуть на біометані) порівняно зі сценарієм № 4. Сектор комерційних будівель споживає менше централізованого тепла у сценарії № 5, і завдяки ширшій термомодернізації це приводить до зниження загального виробництва у 2050 році. Частка централізованих ТН у загальному виробництві тепла у сценаріях № 4 та № 5 є незрівнянно вищою порівняно зі сценарієм № 1, що означає, що великим тепловим насосам для централізованого теплопостачання буде досить складно підтримувати конкурентоспроможність з технологіями виробництва тепла на біоенергетичних джерелах, особливо з когенераційними установками, у разі відсутності обмежень на використання біомаси.

Загалом, як в абсолютних, так і відносних показниках, опалення приміщень за допомогою індивідуальних ТН зростає в кожному підсекторі будівель у всіх сценаріях, хоча й дещо по-різному. У всіх сценаріях комерційні будівлі демонструють відносно нечутливу картину щодо проникнення ТН. Масовий розвиток теплових насосів очікується лише для великої комерції в разі дефіциту біомаси. У малих комерційних будівлях проникнення ТН може досягати максимуму 16,5 %, і трохи менше у разі вищих капітальних витрат, але потім частка знижується до 10 %, оскільки централізоване опалення стає привабливішим для всієї комерції. Проте це сфера, де можуть використовуватися ТН для централізованого теплопостачання, якщо для них будуть забезпечені підтримувальні механізми або ринок біомаси буде нерозвиненим.

Індивідуальні житлові будинки демонструють ту саму концептуальну нечутливість до змінних параметрів. Передбачається, що в разі низьких капітальних витрат впровадження ТН може бути швидшим, ніж у всіх інших випадках, і міські односімейні будинки охочіше реалізують це протягом найближчого десятиліття. Навпаки, високі інвестиції не можуть суттєво змінити привабливість цієї технології для опалення приміщень у процесі низьковуглецевого розвитку, враховуючи, що централізоване опалення не буде значно розширюватися. ТН перевершують опалювальні пристрої на біомасі та можливі газові котли на біометані навіть у сценаріях, де біомаса є доступною.

ПОСИЛАННЯ

1. Podolets R., Diachuk O. (2011) Strategic planning of the energy sector development on the basis of TIMES-Ukraine model (Monographs) // Institute for Economics and Forecasting, UNAS, Kyiv 2011, 150 p. http://ief.org.ua/docs/sr/NaukDop(PodoletsDiachuk)2011.pdf

Цей проєкт отримав фінансування від дослідницької та інноваційної програми Європейського Союзу «Горизонт 2020» за грантовою угодою № 871072.

УДК 620.91

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА СИСТЕМА ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛОТИ ҐРУНТОВОЇ ВОДИ З ВОДОЗАБІРНОЇ СВЕРДЛОВИНИ

О. М. Недбайло[1,2,3], Б. І. Басок[1,2], І. К. Божко[1], В. О. Мартенюк[3]

[1] Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України,
вул. Булаховського, 2, Київ, 03164, Україна,
[2] Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна
[3] Національний університет харчових технологій,
вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601, Україна
тел. +380444242527, e-mail: nan_sashulya@ukr.net

У роботі наведений опис схемотехнічного рішення для використання відновлюваної теплоти ґрунтової води за допомогою теплового насосу. В основу цього рішення покладена ідея поєднання видобування води для потреб водопостачання та можливості одночасного вилучення природної теплоти з однієї свердловини.

Ключові слова: *ґрунтова вода, водопостачання, тепловий насос.*

EXPERIMENTAL SYSTEM OF HEAT SUPPLY USING THE HEAT OF GROUNDWATER FROM A WATER INTAKE WELL

O. Nedbailo[1,2,3], B. Basok[1,2], I. Bozhko[1], V. Marteniuk[3]

[1] Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
st. Bulakhovskogo, 2, Kyiv, 03164, Ukraine,
[2] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
ave. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
[3] National University of Food Technologies,
68, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

The paper describes the circuit design solution for using renewable ground water heat using a heat pump. The basis of this solution is the idea of combining water extraction for water supply needs and the possibility of simultaneous extraction of natural heat from one well.

Key words: *ground water, water supply, heat pump.*

ORCID: [1]0000-0003-1416-9651; [2]0000-0002-8935-4248; [3]0000-0001-7458-0835; [4]0000-0001-9922-9291.

Доволі традиційним способом задовільнити потреби водопостачання є використання водозабірної свердловини. Для реалізації можливостей одночасного використання такої свердловини для індивідуального водорозбору та вилучення природної теплоти для теплопостачання будівлі розроблене принципове технічне рішення з використанням теплового насоса.

В об’ємі води обсадної труби свердловини крім насосу з напірним трубопроводом встановлюється теплообмінник, по якому прокачується проміжний теплоносій, що відбирає відновлювану теплоту та надходить до випарника теплового насоса, де охолоджується, віддаючи теплоту холодоагенту, й повертається до теплообмінника в свердловині. Крім того, створюються умови для додаткового вилучення дисипативної теплоти від зануреного насоса (до 10 % загальної кількості теплоти, що вилучається), який періодично викачує воду для забезпечння водопостачання. При цьому проміжний теплоносій циркулює в замкненому контурі.

Вибраний підхід не потребує додаткових витрат на бурові роботи та додаткової площі земельної ділянки для розміщення окремо теплообмінника. Викачування охолодженої води для потреб водопостачання водночас сприяє надходженню до обсадної труби свердловини внаслідок прискореної інфільтрації у водоносному пласті додаткового об’єму теплішої ґрунтової води. Приток до свердловини забезпечує тим самим перенесення теплоти з периферії до місця її вилучення.

Принципова схема технічного рішення щодо використання водозабірної свердловини для вилучення теплоти ґрунтової води наведена на рис. 1.

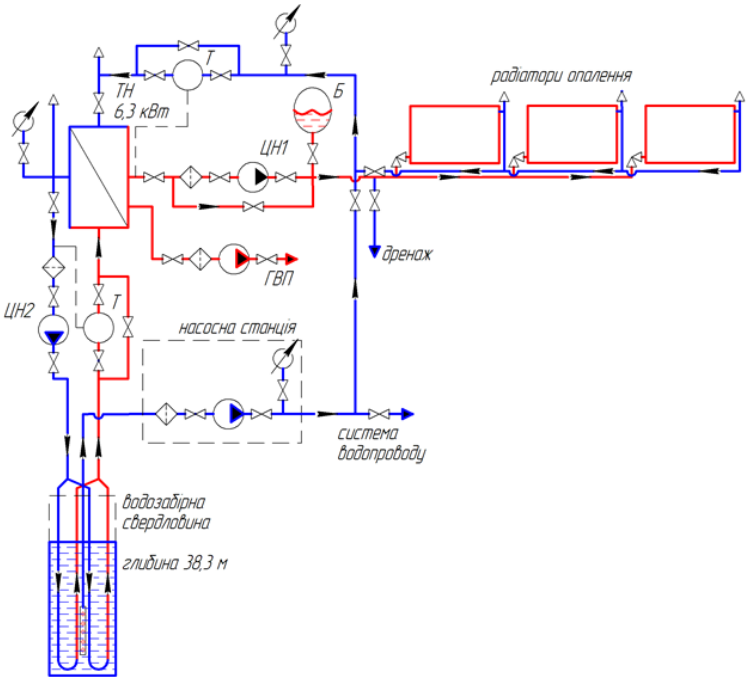


Рис. 1. Система теплопостачання будинку з використанням відновлюваної теплоти ґрунтової води з водозабірної свердловини:ТН – тепловий насос; Б – бак мембранний; ЦН1, ЦН2 – відповідно, циркуляційні насоси контурів опалення і вилучення теплоти; Т – тепломіри; ГВП – гаряче водопостачання

На території Інституту технічної теплофізки НАН України в межах виконання науково-дослідного проєкту пробурена свердловина глибиною 38,3 м і діаметром 0,32 м (рис. 1). Дебет води, яку можна використовувати як технічну або питну, становить близько 1,8 м3/год. У стовпі води висотою понад 5 м розташовані напірний насос заглибного типу з водозабірним фільтром грубого очищення, запірно-регулювальною арматурою та контрольно-вимірювальними приладами (насосна станція Saer FP 98/8/15). Вода зі свердловини має фільтруватись барботажним сепаратором бруду і повітря Spirovent.

Водо-водяний теплообмінник у спеціальному виконанні змонтований у водозабірній свердловині. Він виготовлений з поліетиленової труби Ø20х2,0 мм, що розміщена на заглибному насосі Ø80 мм довжиною 3,0 м. Теплообмінник складається з чотирьох петель довжиною 38,0 м, що закріплені металевими кільцями діаметром Ø146 мм. Теплоносій (підготовлена технічна вода) рухається в контурі ґрунтового теплообмінника за допомогою циркуляційного насоса ЦН2 Wilo Star RS 25/10 із заданою витратою. У системі теплопостачання використовується тепловий насос ТН VDE ТН-6 потужністю 6,3 кВт (технічні характеристики згідно з ТУ У 29.1-35182513-001:2008). Опалювальний контур складається з трьох радіаторів Stelrad Novello 33-600-1100, що розміщуються у лабораторному приміщенні. Номінальна розрахункова теплова потужність кожного становить близько 2 кВт. Група радіаторів оснащена терморегулювальною та повітрявипускною арматурою. Контур опалення виконаний з поліпропіленових труб Ø25х4,2 мм із теплоізоляцією Dermaflex товщиною 6 мм. Для компенсації об’ємного розширення теплоносія при зміні його нагрівання передбачений мембранний бак (експанзомат) Б Reflex об’ємом 25 л. Циркуляцію в системі опалення здійснює насос ЦН1 Wilo Star RS 16/6. Реалізоване автоматичне виключення теплонасосної установки за допомогою датчиків SDF-3 тиску в разі розгерметизації контуру та втраті напору. Обидва контури оснащені тепломірами Т Apator LQM–III–K із цифровим виведенням та аналізом даних на комп’ютері, відповідно, для визначення кількості теплоти, що вилучена з ґрунтової води за допомогою теплового насоса і кількості теплоти, що подана у систему опалення, а також повітрявипускниками для видалення повітря при заповненні системи та її роботі. Для проведення наукових досліджень ефективності роботи теплового насоса температура теплоносія у прямому та зворотному трубопроводах обох контурів вимірюється термоперетворювачами типу ТСП-002к і реєструється вторинними контрольними приладами.

Схема підключення передбачає можливість пасивного кондиціонування повітря в приміщенні при оснащенні радіаторів герметичними піддонами зі зливанням конденсату, що утворюється через конденсацію водяної пари з повітря на поверхні теплообмінних приладів.

УДК 620.91+644.1

ЗАСТОСУВАННЯ ПОВІТРЯНО-ҐРУНТОВИХ ТЕПЛООБМІННИКІВ У СИСТЕМІ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО БУДИНКУ

О. М. Недбайло[1,2,3], Б. І. Басок[1,2], І. К. Божко[1], В. О. Мартенюк[3]

[1] Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України,
вул. Булаховського, 2, Київ, 03164, Україна, e-mail: nan_sashulya@ukr.net
[2] Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна
[3] Національний університет харчових технологій,
вул. Володимирська, 68, м. Київ, 01601, Україна тел. +380444242527,

У роботі представлені вибіркові результати серії експериментальних досліджень теплообміну при проходженні атмосферного повітря через повітряно-ґрунтові теплообмінники в квазістаціонарних умовах експлуатації.

Ключові слова: *відновлювана теплота ґрунту, повітряно-ґрунтовий теплообмінник.*

APPLICATION OF AIR-GROUND HEAT EXCHANGERS IN THE GEOTHERMAL VENTILATION SYSTEM OF AN ENERGY-EFFICIENT BUILDING

O. Nedbailo[1,2,3], B. Basok[1,2], I. Bozhko[1], V. Marteniuk[3]

[1] Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
st. Bulakhovskogo, 2, Kyiv, 03164, Ukraine,
[2] National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
ave. Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
[3] National University of Food Technologies, 68, Volodymyrska str., Kyiv, 01601, Ukraine

The paper presents selected results of a series of experimental studies of heat transfer during the passage of atmospheric air through air-soil heat exchangers under quasi-stationary operating conditions.

Key words: *renewable ground heat, air-ground heat exchanger.*

ORCID: [1]0000-0003-1416-9651; [2]0000-0002-8935-4248; [3]0000-0001-7458-0835; [4]0000-0001-9922-9291

Однією з найважливіших умов тривалого комфортного перебування людей у будівлі є наявність якісного повітря в приміщенні, що забезпечується в процесі експлуатації системи вентиляції. Вона забезпечує повітрообмін у приміщенні для нормалізації параметрів температури й вологості повітря, видалення шкідливих речовин та інших забруднень. Норми повітрообміну в житлових та адміністративних будівлях визначені в Державних будівельних нормах України, де вони є обов'язковими в проєктуванні для нових будівель (в тому числі енергоефективних) або при реконструкції та термомодернізації старих будівель. Останніми роками проводиться значна кількість наукових досліджень, що спрямовані на вивчення та розроблення технологій використання теплового потенціалу ґрунту для кондиціонування повітря, а також його використання в системах опалення. Метою цієї роботи є аналіз результатів натурного дослідження експлуатаційних характеристик повітряно-ґрунтового теплообмінника в системі геотермальної вентиляції енергоефективної будівлі [1, 2]. Експериментальна установка для дослідження теплотехнічних параметрів геотермальної системи вентиляції складається із забірного патрубка, що розташований в місці, захищеному від пливу прямого сонячного випромінювання, П-подібного полівінілхлоридного трубопроводу Ø110х3,2 мм, заглибленого на 2,2 м в землю в горизонтальній площині (рис. 1), осьового вентилятора Вентс ТТ200 для всмоктування повітря в систему повітропроводів, а також вимірювальної системи. Напірно-витратна характеристика вентилятора є майже лінійною у всьому діапазоні продуктивності установки. В ході досліджень параметрів теплообміну при проходженні повітря через теплообмінник додатково використовувався лабораторний автотрансформатор РНО-250-5, що дозволяв змінювати напругу змінного електричного струму живлення вентилятора (його продуктивність у відповідному діапазоні значень напруги).

При цьому проводились вимірювання значень швидкості та температури повітря у вхідному і вихідному патрубках повітряно-грунтового теплообмінника (після ділянки гідродинамічної і теплової стабілізацій потоку) термоанемометром Testo 405-V1 (абсолютні похибки вимірювання температури ± 0,5 ℃ швидкості ± 0, м/с).

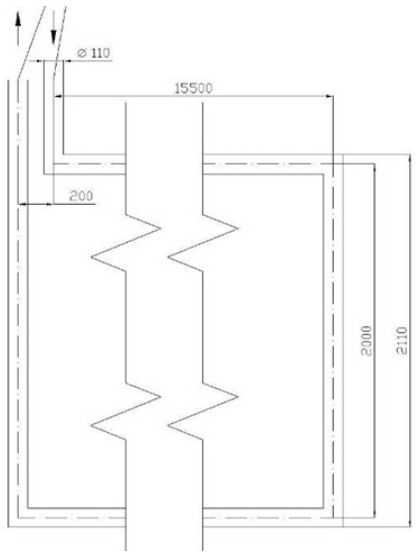


Рис. 1. Схема та основні геометричні розміри контуру П-подібного повітряно-ґрунтового теплообмінника

Вибіркові результати проведених експериментів щодо визначення первинних теплотехнічних характеристик повітряно-ґрунтового теплообмінника в холодний період року (25.02.2025, температура атмосферного повітря на вході − 3,4 ˚С) репрезентовані на рис. 2.

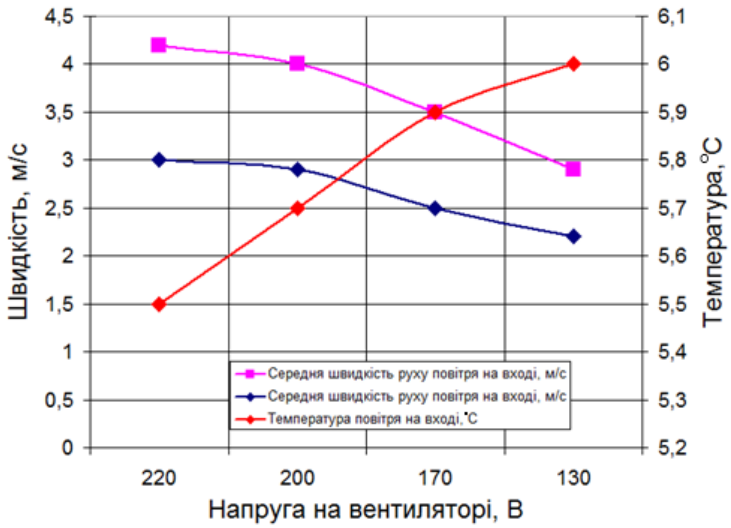


Рис. 2. Первинні результати залежності значень швидкості руху повітря та його температури в П-подібному горизонтальному повітряно-ґрунтовому теплобмінинику від умовної продуктивності вентилятора

На ефективність теплообміну в повітряно-ґрунтових теплообмінниках можуть впливати такі параметри, як глибина розташування теплообмінника, його геометричні розміри і конструкція, значення температури ґрунту і повітря, теплофізичні властивості ґрунту і матеріалу, з якого виготовлено теплообмінник, витрата повітря через систему, а також кліматичні особливості місцевості тощо.

ПОСИЛАННЯ

1. M. V. Tkachenko, S. M. Goncharuk, O. M. Lysenko, M. P. Novitska, O. M. Nedbailo Experimental validation of numerical simulation of air-earth heat exchanger with round cross section. Book of abstract IV International Scientific − Technical Conference «Actual problems of renewable engineering, construction and environmental engineering» 6−8 February 2020, Kielce, Poland, 2020. P. 108−109.
2. B. Basok, O. Nedbailo, M. Tkachenko I. Bozhko Heat transfer during operation of air-ground heat exchangers of geothermal ventilation. Book of abstract IV International Scientific − Technical Conference «Actual problems of renewable engineering, construction and environmental engineering» − 8 February 2020, Kielce, Poland, 2020. P. 11−12.

УДК 621.311.25

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ БІНАРНИХ ГЕОТЕС НА ПРИРОДНИХ РОБОЧИХ ТІЛАХ

Ю. П. Морозов[1], С. В. Дубовський[2, 1]

[1]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна,
тел.: (097) 601-99-17, e-mail: geotherm@gmail.com
[2]Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. М. Капніст, 2А, м. Київ, 03075, Україна,
тел.: (067) 587-67-81, e-mail: s.w.dubovskoy@gmail.com

Представлені результати термодинамічних розрахунків бінарних ГеоТЕС з транскритичним циклом CO_2 у порівнянні з субкритичним циклом на пропані та гідрофторвуглеводні R134a принадно до використання низькотемпературних гідротермальних ресурсів відпрацьованих нафтогазових родовищ з залишковим вмістом метану з урахуванням можливості його спалювання з метою вогневого перегріву робочих тіл.

Ключові слова: *бінарна геотермальна електростанція, органічний цикл Ренкіна, транскритичний цикл CO_2, вогневий перегрів робочого тіла, дегазація геотермальної води, отримання метану.*

ENERGY EFFICIENCY OF BINARY GEOTPP ON NATURAL WORKING BODIES

Yu. Morozov[1], S. Dubovskyi[2, 1]

[1]Institute of Renewable energy of National Academy of Sciences of Ukraine,
20A, Hnata Khotkevych str., Kyiv, Ukraine, 02094
phone: (097) 601-99-17, e-mail: geotherm@gmail.com
[1]Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
2A, M. Kapnist St., Kyiv, 03075, Ukraine
phone: (067) 587-67-81, e-mail: s.w.dubovskoy@gmail.com

The results of thermodynamic calculations of binary Geothermal power plants with a transcritical CO_2 cycle in comparison with a subcritical cycle on propane and hydrofluorocarbon R134a are presented in relation to the use of low-temperature hydrothermal resources of depleted oil and gas fields with residual methane content, taking into account the possibility of its combustion for the purpose of fire overheating of working fluids.

Key words: *binary geothermal power plant, organic Rankine cycle, transcritical CO2 cycle, fire superheating of the working fluid, degassing of geothermal water, Release of residual methane.*

ORCID: [1] 0000-0003-1632-9735; [2]0000-0001-9418-2092.

Основна мета досліджень полягає в аналізі можливостей заміщення традиційного робочого тіла бінарних ГеоТЕС на органічному циклі Ренкіна, яким є синтетичний холодоагент R134a з високим потенціалом глобального потепління природними аналогами – вуглекислим газом (холодоагент R744) чи пропаном (холодоагент R290) з низьким потенціалом глобального потепління. Дослідження проводились за методом порівняльної оцінки термодинамічних циклів ГеоТЕС з відповідним типом робочого тіла за однакових зовнішніх умов. Основним критерієм ефективності робочих тіл вибрано електричну потужність ГеоТЕС за фіксованими характеристиками геотермальної води – температури, витрати та домішки метану – у газовій фазі чи розчині. Розрахункову схему ГеоТЕС, представлено на рис. 1, де прийняті такі позначення: 1 – геотермальні свердловини, 2 – геотермальний насос, 3 – газовіддільник, 4 – насос закачувальний, 5 – парогенератор , 6 – пароперегрівник, 7 – парова турбіна, 8 – конденсатор, 9 – живильний насос, 10 – газопоршнева електростанція (ГПЕ), 11 – відпуск теплоти охолодження ГПЕ. ГеоТЕС працює таким чином. Нагріту воду з геотермальних свердловин 1 за допомогою видобувного насосу 2 подають у газовіддільник 3, де вилучають розчинений чи вільний газ (метан). Дегазовану воду використовують у парогенераторі 5 для нагрівання та випаровування робочого тіла паротурбінного циклу Ренкіна. Охолоджену воду нагнітають у приймальний пласт. Утворену пару робочого тіла догрівають у пароперегрівнику 6, подають у парову турбіну 7, зріджують у конденса-

торі 8 і живильним насосом 9 повертають у парогенератор 5. Метан спрямовують з газовіддільника 3 до газопоршневої електростанції (ГПЕ) 9, або спалюють. В обох випадках продукти згоряння використовують для перегріву робочого тіла у пароперегрівнику 6 і викидають в атмосферу.

Математичні моделі субкритичних і транскритичного термодинамічних циклів реалізовані у програмному середовищі "REFPROP" v.7.1. У процесі порівняльних розрахунків визначалися оптимальні значення температур і тисків випаровування та перегрівання робочих тіл з використанням теплоти геотермальної води та вогневого перегріву пари за критерієм максимуму електричної потужності залежно від температури охолоджувального агента й питомої витрати метану, вивільненого з геотермальної води. У розрахунках прийнято такі параметри геотермальної води: температура на гирлі свердловин – 130 °С, масова витрата – 65 кг/с, вміст метану – 0–5 нм^3/т. Температура охолоджувального агента варіювалася в межах (-10….+10) °С. Критичний температурний натиск у парогенераторі ГеоТЕС із субкритичним циклом становив 10 °С, із транскритичним циклом – 5 °С, у конденсаторі – 8 °С та 2 °С, відповідно. Внутрішній відносний ККД турбін прийнятий рівним 85 %, електромеханічні ККД турбоагрегату, живильного та циркуляційного насосів – відповідно, 75 і 70 %. **Основні результати** порівняльних розрахунків електричної потужності ГеоТЕС залежно від марки робочого тіла й типу термодинамічного циклу за різних температур охолоджувального агента й інтенсивності вогневого перегріву наведено у таблиці.

Вихід метану, нм^3/т	**Електрична потужність, кВт за температури охолоджуючого агенту**								
	+10 °С			**0 °С**			**-10 °С**		
	R134A	R290	R744	R134A	R290	R744	R134A	R290	R744
0	1128	1103	1431	1418	1395	2224	1746	1725	3102
1	1166	1119	1736	1462	1413	2613	1799	1745	3571
2	1177	1132	2055	1475	1427	3015	1814	1762	4051
3	1179	1141	2388	1476	1437	3429	1815	1774	4540
4	1176	1147	2732	1472	1444	3852	1811	1782	5038
5	1171	1152	3086	1466	1449	4284	1804	1787	5543

З представлених даних видно, що заміна традиційного робочого тіла R134a на вуглецевонейтральний пентан (R290) незначно позначається на електричній потужності ГеоТЕС, тоді як

впровадження транскритичних циклів CO_2 може призвести до відчутного зростання електричної потужності, тим більшого, чим нижче температура охолоджувального агента та вище інтенсивність вогневого перегріву. Основним недоліком транскритичних ГеоТЕС на CO_2 є високий тиск робочого тіла – 15 МПа проти 2,5 МПа для ГеоТЕС на пропані та R134a. Разом з тим, як показує досвід створення холодильних агрегатів і теплових насосів, використання CO_2 значно спрощує конструкцію та знижує масогабаритні характеристики компресорів, турбін, теплообмінників та іншого обладнання. З огляду на це подальші дослідження транскритичних циклів ГеоТЕС на CO_2 можна віднести до актуальних задач подальшого розвитку геотермальної енергетики в Україні.

ПОСИЛАННЯ

1. Dilshad S., Kalair A., Khan N. Review of carbon dioxide (CO2) based heating and cooling technologies - past Present and future outlook. Int. J. Energy Res. 2020;44:1408–1463.
2. E.G. Feher. The supercritical thermodynamic power cycle. Energy Conversion Volume 8, Issue 2, September 1968, Pages 85-90. URL: https://doi.org/10.1016/0013-7480(68)90105-8. (дата звернення: 15.12.2024).
3. Chen, Y., Lundqvist, P., Johansson, A., Platell, P. A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an organic rankine cycle with R123 as working fluid in waste heat recovery. Applied Thermal Engineering, Volume 26, Issues 17–18, December 2006, Pages 2142-2147. URL: https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.04.009 (дата звернення: 15.12.2024).
4. Song, J., Wang, Y., Wang, K., Wang, J., & Markides, C. N. (2021). Combined supercritical CO2 (SCO2) cycle and organic Rankine cycle (ORC) system for hybrid solar and geothermal power generation: Thermoeconomic assessment of various configurations. Renewable Energy, 174, 1020-1035. URL: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.04.124 (дата звернення: 15.12.2024).

5. Jian Song , Xiaoya Li , Kai Wang , Christos N. Markides Parametric optimisation of a combined supercritical CO2 (S-CO2) cycle and organic Rankine cycle (ORC) system for internal combustion engine (ICE) waste-heat recovery. Energy Conversion and Management. Volume 218, 15 August 2020, 112999. URL: https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112999 (дата звернення: 15.12.2024).

6. Haoshui Yu, Donghoi Kim, Truls Gundersen. A study of working fluids for Organic Rankine Cycles (ORCs) operating across and below ambient temperature to utilize Liquefied Natural Gas (LNG) cold energy. Energy, Volume 167, 15 January 2019, Pages 730-739. URL: https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.021 (дата звернення: 15.12.2024).

7. E. Sauret, S. Rowlands, A., Candidate radial-inflow turbines and high- density working fluids for geothermal power systems, Energy, Volume 36, Issue 7, July 2011, Pages 4460-4467. URL: https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.03.076 (дата звернення: 15.12.2024).

8. Дубовський С. В., Морозов Ю. П. Технологічні схеми ГеоТЕС на геотермальних родовищах з аномально високим пластовим тиском. Відновлювальна енергетика, № 2(65) (2021), с. 81-92. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).81-92. (дата звернення: 15.12.2024).

УДК 621.548:620.92:624.13

ОСВОЄННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЗАКАЧУВАННЯ ТА АКУМУЛЮВАННЯ ТЕПЛОТИ В ПРОНИКНІ ПЛАСТИ ПОЛТАВСЬКОГО ВОДОНОСНОГО ГОРИЗОНТУ

Ю. П. Морозов[1], О. В. Бачеріков[2], А. А. Барило[3], В. Г Олійніченко[4], І. В. Лобанова[5], А. В. Сорока[6], В. В. Севрюк[7]

[1, 2, 3, 4, 5, 6, 7] Інститут відновлюваної енергетики НАН України
03143, м. Київ, вул. вул. Метрологічна, 50,
тел./факс 206-28-09, e-mail: geotherm@ukr.net

Акумулювання надлишкової теплоти у водоносному горизонті – це перспективний напрям розвитку акумуляційних систем. Основними перевагами цього методу є нижчі інвестиційні витрати і великі об'єми теплоакумулювального середовища.
Наведено результати експериментальних досліджень з акумулювання теплоти в полтавському водоносному горизонті. Акумулювання теплоти проводили шляхом закачування в водоносний горизонт водопровідної води, нагрітої сонячними колекторами до температури 25–36 ^{0}C, в експлуатаційну свердловину № 8. Для спостереження за розповсюдженням теплового фронту вибрана свердловина № 10, яка розташована на відстані 4,11 м від свердловини № 8.
Результати досліджень показали принципіальну можливість закачування великих об'ємів теплоносія в полтавський водоносний горизонт.

Ключові слова: *акумулювання, теплота, водоносний горизонт, тепловий фронт, акумуляційна система.*

DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY OF HEAT INJECTION AND ACCUMULATION IN THE PERMEABLE LAYERS OF THE POLTAVA AQUIFER

Yu. Morozov[1], O. Bacherikiv[2], A. Barylo[3], V. Olinichenko[4], I. Lobanova[5], A. Soroka[6], V. Sevruk[7]

[1, 2, 3, 4, 5, 6] Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
03143, Kyiv, str. St. Metrological, 50,
phone/fax 206-28-09, e-mail: geotherm@ukr.net

The accumulation of excess heat in an aquifer is a promising area for the development of storage systems. The main advantages of this method are lower investment costs and large volumes of heat storage medium.
Presents the results of experimental studies on heat storage in the Poltava aquifer. The heat accumulation was carried out by injecting tap water heated by solar collectors to a temperature of 25 - 36 ^{0}C into the aquifer in production well No. 8. To observe the heat wave propagation, well No. 10 was selected, which is located at a distance of 4.11 m from well No. 8.
The results of the research showed the fundamental possibility of injecting large volumes of coolant into the Poltava aquifer.

Keywords: *accumulation, heat, aquifer, thermal front, accumulation system.*

[1] http://orcid.org/0000-0003-1632-9735

[3] http://orcid.org/0000-0001-7981-6464

[5] http://orcid.org/0009-0007-0625-8052

Акумулювання теплоти може відбуватись у різних середовищах [1]: 1) у воді; 2) у суміші води та гравію; 3) у ґрунті чи гірських породах; 4) у водоносному горизонті. Згідно з [1], значення кількості акумульованої теплоти на одиницю об'єму теплоакумулювального матеріалу змінюється так: найкращі характеристики – у води, далі приблизно на одному рівні йде суміш води з гравієм та водоносний горизонт, найгірші характеристики спостерігаються в гірських породах. Разом з тим, питомі інвестиційні витрати на спорудження акумуляційних систем є найдешевшими саме

для систем акумулювання у водоносному горизонті [2]. Це пояснюється тим, що чим більшим є об'єм теплоакумулювального середовища системи сезонного акумулювання, тим вони є дешевшими.

З метою освоєння технології закачування та акумулювання теплоти в проникні горизонти були проведені експериментальні дослідження з підземного акумулювання нагрітого теплоносія в полтавському водоносному горизонті.

Під час проведення досліджень як теплоносій використовувалась водопровідна вода, нагрів якої здійснювався сонячними колекторами.

Експериментальні дослідження проводились на прибудинковій території ІВЕ НАН України за адресою м. Київ, вул. Метрологічна, 50 у період з 11.07.2024 по 29.09.2024.

Початкова температура пластової води становила 9 ^{0}C.

Температура теплоносія змінювалась впродовж всього періоду експерименту в діапазоні від 18 ^{0}C (11.07.2024) до 38 ^{0}C (20.09.2024). Тому для визначення температури теплоносія, якій наливався в поглинальну свердловину № 8, скористаємось формулою для розрахунку середньозваженої за об'ємом:

$$t_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^{n} V_i \cdot t_i}{\sum_{i=1}^{n} V_i};$$

де t_{cp} – середньозважена температура теплоносія,^{0}C;
t_i – поточна температура,^{0}C
V_i – поточний об'єм, *м^3.*

Згідно з розрахунками середньозважена температура теплоносія дорівнювала 25,6 ^{0}C.

Свердловиною для закачування була експлуатаційна свердловина № 8, а для спостереження розповсюдження теплового фронту використовували свердловину № 10, яка розташована на відстані 4,11 м від свердловини № 8. Схема розташування та геологічний розріз свердловин № 8 та № 10 наведено на рисунку.

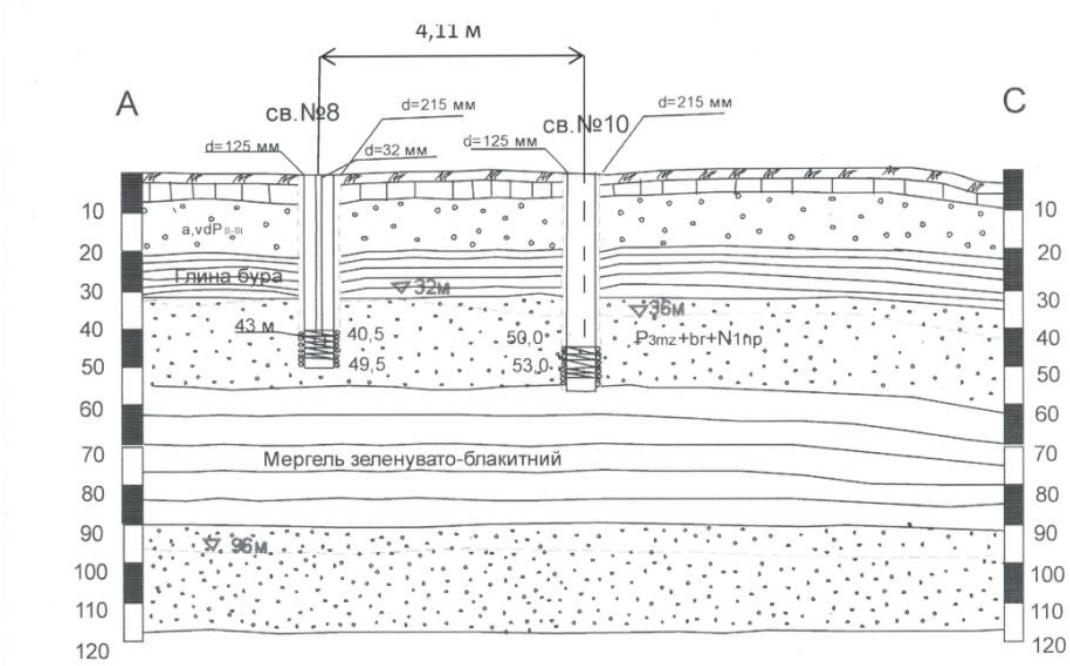


Рисунок. Геологічний розріз ділянки дослідження та конструкція свердловин № 8 та № 10 за адресою м. Київ, вул. Метрологічна, 50

Закачування проводилось в робочі дні в середньому по три години на день підігрітою водою з сонячних колекторів з середньою температурою 27 °C.

За весь період закачування у водоносний горизонт було закачано 154,5 м^3 підігрітого теплоносія. За добу закачувалось 3,5–4 м^3 підігрітої води.

Заміри температур та рівня у свердловинах протягом терміну закачування проводили три рази з використанням свердловинного вимірювача рівня та температури Dolphin T.

Витрати води вимірювали за допомогою лічильника води Zenner ^{TM} зав. № 05857249 з номінальним відбором води Q_n = 1,5 м^3/год та максимальною температурою t = 40 ^{0}C.

Також проводили заміри температур у контрольній свердловині № 1, яка розташована на відстані 13 м від експлуатаційної свердловини № 8, в яку закачувалась вода, підігріта в сонячних колекторах.

Статичний рівень у свердловинах полтавського горизонту на момент експерименту становив 40 м, температура води статичного рівня 9,1 °C. За час проведення закачування статичний рівень практично не змінювався.

Результати замірів температур у свердловинах зведені в таблицю.

Таблиця. Результати замірів температур в свердловинах

№ свердловини /глибина заміру, м	Температура води у горизонті, °C		
	25.09.2024	26.09.2024	27.09.2024
8 закачка	31	30	31
10 / 40	10,1	10	10,1
10 / 50	9,4	9,3	9,4
1 / 40	9,3	9,2	9,3
1 / 50	8,7	8,6	8,7

Висновки

1. Технічні можливості не дозволяли закачувати більше теплоносія у водоносний горизонт.
2. Результат досліджень показує, що температурний фронт дійшов до свердловини № 10 і підняв температуру на 0,8 °C порівняно з температурою в контрольній свердловині № 1, яка розташована на відстані 13 м від експлуатаційній свердловини № 8.
3. Стовбуром води 40–50 м забезпечувався дебіт води у свердловині № 8 1–1,2 м^3/год через фільтр цієї свердловини довжиною 9 м.
4. Закачування води відбувалося безперервно в період 11.07.2024–29.09.2024.
5. Про нагрів води у свердловині № 10 свідчить підйом температури у свердловині.
6. Постійний рівень води при закачуванні вод свідчить про великий об’єм пустот, які треба заповнити.
7. Для рівномірного акумулювання теплоти у водоносному горизонті необхідно вибирати пласт з однорідними фільтраційними властивостями по товщині і площині залягання.
8. По результатах досліджень запропоновано спосіб оцінки і напрямів просування фронту підігрітої води від нагнітальної свердловини пропорційно величині зміни температури в навколишніх свердловинах.

ПОСИЛАННЯ

1. *Xu, J.* A review of available technologies for seasonal thermal energy storage / J. Xu, R. Z. Wang, Y. Li. Solar Energy. 2014. Vol. 103. P. 610–638. ISSN 0038-092X. doi: 10.1016/j.solener.2013.06.006
2. *Schmidt, T.* Seasonal thermal energy storage in Germany / T. Schmidt, D. Mangold, H. Müller-Steinhagen. ISES Solar World Congress, 14–19 June, Göteborg, Schweden. 2003.

УДК 621.577.2

СПОСІБ ВИДОБУТКУ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ЗА ДОПОМОГОЮ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЦИРКУЛЯЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Ю. П. Морозов[1], О. В. Бачеріков[2], В. Г. Олійніченко[3], І. В. Лобанова[4]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна,
тел. +38 044 206 2809, e-mail: geotherm@ukr.net

THE METHOD OF PRODUCTION OF HEAT ENERGY USING THE GEOTHERMAL CIRCULATION SYSTEM

Yu. Morozov[1], O. Bacherikov[2], V. G. Olynichenko[3], I.V. Lobanova[4]

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
str. Metrolohichna, 50, 03143, Kyiv, UA,
phone/fax 206-28-09, e-mail: geotherm@ukr.net

За період з 1987 до 2002 року співробітниками відділу геотермальної енергетики в Криму та на Закарпатті збудовано 11 геотермальних теплових станцій з використанням ГЦС технології (геотермальної циркуляційної системи).

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИСТЕМ ГЕОТЕРМАЛЬНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ, ЩО ЕКСПЛУАТУЮТЬСЯ ТА ПРОЕКТУЮТЬСЯ ДО БУДІВНИЦТВА В КРИМУ

№№ п/п	Населені пункти	Термін експлуатації	Потужність, МВт без тну/с тну	Температура води, °С	Дебет свердловини, $м^3$/год.	Об'єкти теплопостачання	Річна економія палива, т у.п.
1	с. Ільїнка	1986-1988	1,0/4,3	57	72	житлове селище	492/2116
2	с. Сизовка	1988-1997	1,3/4,6	61	72	житлове селище	640/2263
3	с. Ново-Олексіївка	1991-1993	1,9/11,4	53	205	молочна ферма, житлове селище	935/5609
4	с. Котельниково	1988-1989	1,6/4,7	65	67	житлове селище	787/2312
5	с. Трудове	1989-1990	1,6/6,0	59	96	теплиці, гаряче водопостачання	787/2952
6	с. Зернове	1989-2008	0,4/3,8	50	72	гаряче водопостачання	197/1870
7	с. Рівне	1993 (змонтовано на 80%)	2,7/9,2	62	139	житлове селище	1328/4526
8	с. Янтарне	1992-2002	4,2/6,0	85	65	агропромисловий комплекс	2066/2952
9	с. П'ятихатки	1994-2004	1,2/8,9	51	167	гаряче водопостачання	590/4379
10	с. Медведівка	2002-2008	0,7/2,0	67	28	дитячий сад, житлове селище	344/984
11	с. Предмостне	є 4 свердловини	3,9/10,3	70	136	житлове селище	1919/5068
	Всього		**20,5/71,2**				**10086/35031**

Відомий спосіб видобутку теплової енергії за допомогою геотермальної циркуляційної системи, яка включає видобувні й нагнітальні свердловини, що розкривають продуктивний пласт з теплоносієм і утворюють циркуляційну гідравлічну систему, в якій теплоносій з пласта через видобувні свердловини підіймається на поверхню, віддає тепло в теплообміннику та повертається по нагнітальних свердловинах в продуктивний пласт [1]. Недоліком цього способу є значні енерговитрати на нагнітання відпрацьованого теплоносія в продуктивний пласт на початковій стадії видобутку.

Зменшення значних енерговитрат вирішується тим, що в спосіб видобутку теплової енергії за допомогою геотермальної циркуляційної системи введена нова технологічна операція – роботу геотермальної циркуляційної системи розділяють на дві стадії, при цьому на першій стадії відпрацьований теплоносій закачують у проникний пласт, що залягає вище, а на другій стадії функціонування системи закачування відбувається традиційним шляхом – у продуктивний пласт, з якого видобувають термальну воду.

Суть запропонованого способу видобутку тепла за допомогою геотермальної циркуляційної системи розкрито кресленнями, які наведені на рис. 1.

На рисунку наведено запропоновану схему геотермальної циркуляційної системи. Для підтвердження можливості реалізації запропонованої схеми геотермальної циркуляційної системи в геолого-технічних умовах України і її переваг над відомою схемою використано промислові дані щодо повернення супутніх пластових вод у надра на Малодівицькому родовищі [2].

В Україні відомі водоносні горизонти, що залягають вище продуктивних пластів з теплоносієм і можуть бути використані для закачування відпрацьованого теплоносія. Так, у центральній частині України в межах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) водоносний комплекс тріасу найбільше відповідає гідрогеологічним і гідродинамічним вимогам збереження довкілля при поверненні пластових вод у надра [2].

Водоносний горизонт тріасу відповідає головній вимозі до поглинальних пластів: він надійно ізольований у покрівлі й підошві потужними товщами глин регіонального простягання в тріасових та пермських відкладах, що зумовлює дуже повільний водообмін і виключає його зв'язок з іншими водоносними горизонтами в цьому регіоні.

Тріасовий водоносний горизонт добре витриманий по товщині, характеризується високими ємнісними і фільтраційними властивостями. Товщина в межах ДДЗ становить до 350 м, пористість досягає до 30 %, а середня проникність змінюється від 300–600 до 1479–3141 мД. Пластові води мають хлоридний натрієвий та хлоридний кальцієво-натрієвий склад з мінералізацією від 55 до 140 г/дм^3 і не використовуються в народному господарстві [2].

На Прикарпатті для повернення пластових вод рекомендується водонапірна система карпатій-крейдових відкладів. Пористі колектори карпатій-крейди розкриті на території близько 1000 км^2 майже тисячею свердловин. Пласти залягають на глибинах до 2000 м і є гідрогеологічно закритими. Водоносний басейн карпатій-крейди характеризується зниженим пластовим тиском, який в середньому становить 30–50 % гідростатичного [3], що зменшує енергетичні витрати при закачуванні відпрацьованих термальних вод.

Таким чином, водоносні горизонти тріасу та карпатій-крейдових відкладів можуть використовуватись для закачування відпрацьованих термальних вод при видобутку тепла за допомогою геотермальної циркуляційної системи.

Порівняльну оцінку енергетичних витрат на закачування пластових вод у продуктивний горизонт та водоносний пласт тріасу, що залягає вище, зроблено на основі фактичних даних повернення супутніх пластових вод (СПВ) у надра на Малодівицькому нафтовому родовищі в 2017–2018 роках. У роботі [2] наведено дані повернення СПВ у поглинальний водоносний горизонт тріасу ($Т_п$) та в продуктивні горизонти (С-8-9, Б-12) для підтримки пластового тиску. При цьому річний обсяг повернення СПВ у продуктивні горизонти через нагнітальні свердловини № 9 і № 14 становив 35 770 м^3, а у водоносний горизонт тріасу через нагнітальні свердловини № 25, № 36, № 41 за аналогічний період – 222–285 м^3.

Результати аналізу параметрів нагнітання СПВ у надра на Малодівецькому нафтовому родовищі наведено в таблиці. При цьому, зважаючи на наявні дані [2], коефіцієнт приймальності свердловин визначали за формулою:

$$К_п = Q_н/Р_г.$$

Показники енергетичних витрат на повернення СПВ у надра (на прикладі Малодівецького нафтового родовища) наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Показники енергетичних витрат на повернення СПВ у надра

Мета повернення СПВ у надра	Індекс горизонту нагнітання СПВ	Номери нагнітальних свердловин	Показники нагнітання		
			тиск на гирлі свердловини ($Р_г$), Мпа	приймальність свердловини ($Q_н$), м^3/добу	Коефіцієнтприймальності ($К_п$), м^3/добу/МПа
Закачування в продуктивний горизонт для підтримки пластового тиску	С-8+9	9	10	42	4,2
	Б-12	14	10	56	5,6
Утилізація (у водоносний горизонт тріасу)	$Т_п$	25 36 41	5 5 5	51 291 267	10,2 58,2 53,4

Як видно з таблиці, коефіцієнт приймальності водоносного горизонту тріасу приблизно в 2–10 разів вищий, ніж при нагнітанні в продуктивний горизонт.

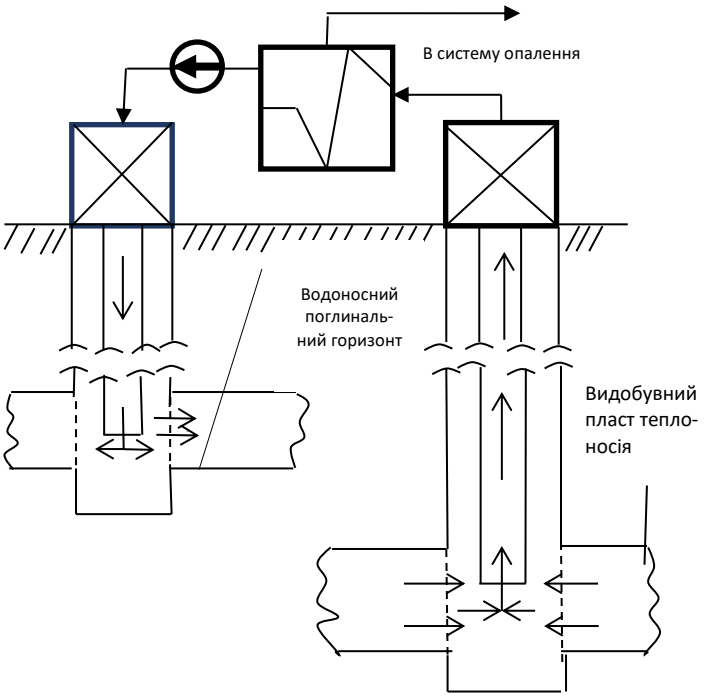


Рис. 1

ПОСИЛАННЯ

1. Морозов Ю. П. Добыча геотермальных ресурсов и аккумулирование теплоты в подземных горизонтах : монография. Киев : Наук. думка, 2017. 196 с.
2. Звіт з оцінки впливу на довкілля планової діяльності з видобування корисних копалин НГВУ «Чернігівнафтогаз» ПАТ «Укрнафта» на Малодівицькому родовищі. Київ, 2018. 171 с.
3. Іщенко О. М., Колодій В. В., Плужнікова В. Л. Елементи мінімізації техногенного впливу на геологічне середовище і довкілля при розробці газових і газоконденсатних родовищ та експлуатації підземних сховищ газу у Прикарпатті. Науковий вісник Національного Технічного Університету Нафти і Газу. 2002. № 3. С. 297–309.

УДК 621.311.25

ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ВЕНТИЛЯЦІЙНОГО ҐРУНТОВОГО ТЕПЛООБМІННИКА НА ОСНОВІ ШТУЧНОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Б. І. Басок[1, 2], М .П. Новіцька[1], О. В. Зур'ян[3]

1 – Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Булаховського, 2, м. Київ, 03164, Україна, тел.: (044) 424-98-80, e-mail: mmarina@ukr.net
2 – НТУУ «КПІ» імені Ігоря Сікорського, просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
3 – Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, м. Київ; 03143, Україна

Під час прогнозування теплового стану вентиляційного ґрунтового теплообмінника було використано методи аналізу на основі штучних нейронних мереж.

Ключові слова: *вентиляційний ґрунтовий теплообмінних, відновлювані джерела енергії, штучні нейронні мережі, температура, вологість повітря.*

PREDICTION OF THE THERMAL STATE OF A VENTILATION GROUND HEAT EXCHANGER BASED ON AN ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

B.Basok[1,2], M. Novitska[1], O. Zurian[3]

1- Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine, 2 Bulahovskoho str., Kyiv, Ukraine, 03164
phone: (044) 424-98-80, e-mail: mmarina@ukr.net
2 - National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute»,
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056,
3 - Institute of renewable energy, NAS Ukraine, 50, Metrolohichna str., Kyiv, Ukraine, 03143

When predicting the thermal state of a air-soil heat exchanger, analysis methods based on artificial neural networks were used.

Key words: *ventilation ground heat exchanger, renewable energy sources, artificial neural networks, temperature, air humidity.*

ORCID: 0000-0002-8935-4248; 0000-0003-2867-101X; 0000-0002-2391-1611

Відомо, що під час вентиляції приміщень втрачається приблизно 15 % теплоти, використаної на опалення будинків. Ці витрати можливо скоротити завдяки застосуванню системи вентиляції з використанням ґрунтових теплообмінників. Такий теплообмінник являє собою систему трубопроводів, що облаштовані в ґрунті на певній глибині верхнього шару, по яких в будівлю постачається припливне повітря довкілля. Вони вважаються ефективними для зменшення витрат на опалення та кондиціонування будівель.

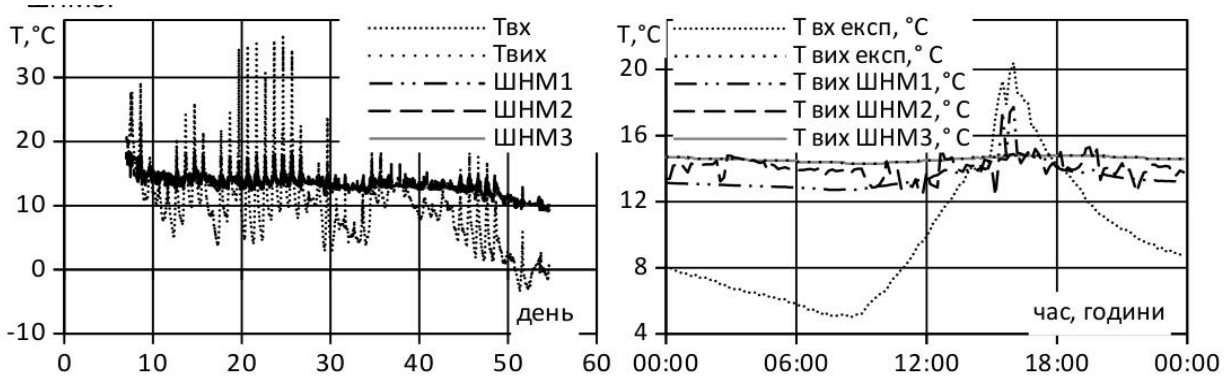
Метою цієї роботи є спроба прогнозування температури на виході з повітряно-ґрунтового теплообмінника, що розташований в м. Києві. Для тренування ШНМ було використано експериментальні дані, отримані на повномасштабному стенді для дослідження теплофізичних процесів у системі вентиляції експериментального пасивного будинку Інституту технічної теплофізики [1]. Інноваційна система вентиляції цієї енергоефективної будівлі за допомогою повітряно-ґрунтового теплообмінника є одним із напрямів підвищення її енергоефективності.

Експериментальний стенд містив приймальний пристрій, теплообмінник ґрунт-повітря та вимірювальну систему [2]. Приймальний пристрій був розташований в захищеному від прямого сонячного випромінювання місці. Теплообмінник ґрунт-повітря кільцеподібної форми (труба ПВХ Ø 110) довжиною 43 м. п. облаштовано на глибині 2,5 м. Для прокачування повітря по теплообміннику було використано вентилятор Вентс ТТ 150 PRO. Вимірювальна система складалась із термоанемометра Testo та напівпровідникових датчиків BME280 з вторинним приладом на основі мікропроцесора, що реєструють температуру, вологість і тиск атмосферного повітря.

Для розрахунків було використано просту штучну нейронну мережу Sequential. Як вхідні параметри для нейронної мережі використовувались температура повітря на вході в теплообмінник, його вологість та температура на виході за попередню годину. Для розрахунків використовувався інтерфейс прикладного програмування Tensorflow API та його модуль Keras. Експериментальні дані для аналізу у всіх розглянутих варіантах було поділено у пропорції 70, 15, 15 % для навчання нейронної мережі, її валідації та тестування відповідно. Базова модель складалась з одного

прихованого шару та 10 нейронів. У роботі наведено аналіз впливу різних факторів, а саме кількості нейронів прихованого шару, кількості шарів, кількості ітерацій, різних оптимізаторів та функцій активації, на показники ефективності моделі.

Крім того, розглянуто три варіанти моделей з використанням різних даних як вхідних нейронів (рис. 1, табл. 1). Було встановлено, що коефіцієнт середньоквадратичного відхилення для тестової частини масиву даних варіюються від 0,05 до 0,949 °С. Мінімальне середнє відхилення прогнозованих даних від експериментальних виявилось у моделі з використанням температури повітря на вході в повітряно-ґрунтовий теплообмінник, вологості й температури на виході за попередню годину, воно становило -0,001 °С.



а *б*

Рис. 1. Порівняння експериментальних і прогнозованих ШНМ даних температур на виході з повітряно-ґрунтового теплообмінника: а – весь масив даних від 7 вересня до 21 листопада 2018 року, б – доба 12 вересня 2018 року

Таблиця 1. Показники ефективності моделей, отримані на тестовій частині масиву даних, які не використовувались при навчанні ШНМ

Назва	Вхідні дані	Кількість ітерацій	RMSE, °C	MAPE, %	MBE, °C
ШНМ1	$T_{вх}$	5000	0.949	5.305	-0.087
ШНМ2	$T_{вх}$, Н	5000	0.668	3.454	0.046
		10 000	0.636	3.355	-0.084
		20 000	0.626	3.207	-0.001
		40 000	0.654	3.274	0.078
ШНМ3	$T_{вх}$, Н, $T_{вих}$	5000	0.055	0.215	0.020
		10 000	0.051	0.167	-0.003
		20 000	0.050	0.145	0.002
		40 000	0.061	0.173	-0.002

Висновки

Тестування запропонованих моделей показало, що штучна нейронна мережа прогнозує температуру на виході з повітряно-ґрунтового теплообмінника з урахуванням впливу погодних умов із задовільною точністю.

Відповідно, штучні нейронні мережі можна використовувати при прогнозуванні теплового стану повітряно-ґрунтового теплообмінника, наприклад теплового насоса, для якого погодні умови є одним з основних визначальних факторів.

Для налаштування тепло насосних систем необхідні експериментальні дані, що представляють опис теплового стану ґрунтів неглибокого залягання та реальної геології.

ПОСИЛАННЯ

1. Basok B., Novitska M., Goncharuk S., Moroz M., Tymoshchenko A. Experimental Passive House of the Institute of Engineering Thermophysics NAS of Ukraine. in 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). IEEE, Kyiv, Ukraine, 2019. Pp. 108–111 doi:10.1109/ESS.2019.8764182.
2. Basok B., Pavlenko A., Nedbailo A., Bozhko I., Novitska M., Koshlak H., Tkachenko M. Analysis of the Energy Efficiency of the Earth-To-Air Heat Exchanger. Rocznik Ochrona Środowiska. 2022. 24. P. 202–213. https://doi.org/10.54740/ros.2022.015

УДК 504.43; 621.577.2

ЕКОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ТЕХНОЛОГІЇ ДВОСТАДІЙНОГО ВИДОБУВАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ

О. В. Зур'ян

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, alexey_zuryan@ukr.net

Проведено аналіз екологічних ризиків під час використання технології двостадійного видобування геотермальних ресурсів. Запропоновано науково обґрунтовані заходи, що зменшують негативний вплив на оточуюче середовище при застосуванні цієї технології.

Ключові слова: *відновлювана енергетика. водоносний горизонт, геотермальна енергетика*

ENVIRONMENTAL ASPECTS OF THE TWO-STAGE GEOTHERMAL RESOURCE EXTRACTION TECHNOLOGY

O. Zurian

Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine,
street Hnata Khotkevycha 20A, Kyiv, alexey_zuryan@ukr.net

An analysis of environmental risks in the use of two-stage geothermal resource extraction technology is carried out. The scientifically grounded measures that reduce the negative impact on the environment when using a two-stage technological process are proposed.

Keywords*: renewable energy. aquifer, geothermal energy*

ORCID: 0000-0002-2391-1611

Вступ. Геотермальна енергетика є перспективним напрямом розвитку відновлюваних джерел енергії, однак її впровадження пов'язане з низкою екологічних викликів. Одним з ключових підходів до підвищення ефективності та екологічної безпеки є технологія двостадійного видобування геотермальних ресурсів. Система складається з видобувних і нагнітальних свердловин, які розкривають продуктивний пласт, що містить теплоносій (термальну воду). Основною технологічною особливістю способу є поділ процесу повернення теплоносія на дві стадії. На першій стадії відпрацьований теплоносій закачують у проникний пласт, що залягає вище. а на другій стадії процес відбувається традиційним шляхом – теплоносій повертається в продуктивний пласт. У роботі проведено аналіз основних екологічних ризиків, пов'язаних із цією технологією, зокрема можливих забруднень водоносних горизонтів, змін у геомеханічних процесах та викидів розчинених газів. На основі досліджень запропоновано науково обґрунтовані заходи, спрямовані на мінімізацію негативного впливу на довкілля та забезпечення сталого розвитку геотермальної енергетики.

Мета дослідження – оцінити екологічні ризики технології двостадійного видобування геотермальних ресурсів та розробити заходи для мінімізації її негативного впливу на навколишнє середовище.

Відповідно до поставленої мети були виконані такі завдання. Проаналізовано потенційні екологічні загрози, пов'язані з використанням двостадійного видобування, включно з забрудненням водоносних горизонтів, викидами газів та геомеханічними змінами. Оцінено ефективність чинних методів екологічного моніторингу та контролю за видобутком геотермальних ресурсів. Запропоновано науково обґрунтовані заходи щодо зниження техногенного впливу на довкілля при застосуванні двостадійної технології. Розроблено рекомендації для вдосконалення нормативно-правового регулювання екологічної безпеки в геотермальній енергетиці.

Виклад основного матеріалу

При використанні технології двостадійного видобування геотермальної енергії, яка передбачає наявність видобувних та нагнітальних свердловин, що забезпечують поділ процесу реін'єкції теплоносія на дві стадії, можливі різноманітні екологічні ризики й техногенні загрози. Одним з ключових викликів є ризик забруднення водоносних горизонтів, що виникає через можливе проникнення термальних вод у прісноводні шари. Це може спричинити зміну

хімічного складу підземних вод, накопичення розчинених газів та мінералізованих речовин, а також порушення гідродинамічного режиму. Крім того, існує ймовірність неконтрольованого витоку теплоносія або його гідротермального прориву, що може призвести до деградації підземних екосистем.

Ще однією серйозною загрозою є індукована сейсмічність, оскільки закачування великих обсягів теплоносія у пласт, що залягає вище, змінює напружений стан гірських порід, що може провокувати мікроземлетруси. Водночас можливі локальні підняття або просідання ґрунту через зміну тиску в пластах, що загрожує інфраструктурним об'єктам. Додатково існує ризик механічної нестабільності гірських порід у місцях буріння свердловин, що може призвести до зсувів або порушення структурної цілісності покладу.

Важливим аспектом є імовірні викиди розчинених газів, зокрема CO_2, CH_4 та H_2S, у разі порушення герметичності свердловин або несправності обладнання. Це може спричинити забруднення атмосфери, утворення кислотних дощів та негативний вплив на здоров'я населення. Також при циркуляції теплоносія можливе аерозольне забруднення, коли дрібнодисперсні частинки та солі викидаються в повітря разом з парами термальних вод.

Окремої уваги потребують хімічні та корозійні загрози, оскільки в процесі експлуатації свердловин може відбуватися осадження мінералів та утворення карбонатних і сульфатних відкладень у трубопроводах. Це знижує ефективність роботи системи та збільшує витрати на її обслуговування. Крім того, висока мінералізація теплоносія спричиняє корозію металевих елементів, що може призвести до втрат герметичності свердловин і потрапляння забруднювачів у довкілля.

Двостадійний процес також може мати негативний вплив на природні екосистеми. Зокрема, підвищення температури навколишнього середовища в районах розташування геотермальних станцій може змінювати локальний мікроклімат. Вплив на хімічний склад ґрунтових вод через міграцію термальних флюїдів може призвести до деградації природних біоценозів. Також існує ризик виснаження геотермального резервуара в разі неефективного управління процесом, що може зменшити його довговічність і економічну доцільність використання.

Висновок

Попри потенційні переваги двостадійного видобування геотермальних ресурсів, така технологія створює низку екологічних викликів, серед яких найбільш значущими є забруднення водоносних горизонтів, сейсмічні ризики, газові викиди, корозійні та геомеханічні загрози. Для їх мінімізації необхідне впровадження систем екологічного моніторингу, а також розробка заходів для стабілізації пластового тиску та мінімізації сейсмічної активності. Окремо стоїть актуальне питання розробки рекомендацій щодо нормативного регулювання, а саме формування вимог до екологічної оцінки та розробка стандартів безпечної експлуатації двостадійних геотермальних систем. Тільки комплексний підхід до управління ризиками дозволить зробити геотермальну енергетику екологічно безпечною та ефективною.

ПОСИЛАННЯ

1. Морозов Ю. П. Видобування і використання геотермальних ресурсів України: монографія / Ю. П. Морозов, А. А. Барило, С. В. Дубовський, Д. М. Чалаєв. Київ: ІВЕ, 2024. 132 с.
2. Морозов Ю. П., Барило А. А., Чалаєв Д. М., Добровольский М. П. (2019). Енергетична ефективність використання перших від поверхні водоносних горизонтів для тепло- і хладопостачання. Відновлювана енергетика. 2019. № 2(57). С. 70–78. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).70-78
3. Goshovskii S. V., Zurian O. V. Human-induced load on the environment when using geothermal heat pump wells / S. V. Goshovskii, O. V. Zurian. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2020. Vol. 29. No. 1. P. 57–68. https://doi.org/10.15421/112006
4. Zurian O. V., Barilo A. A. Impact of the natural temperature regime of the upper layers of earth on efficiency of a hydrothermal heat pump system. Journal of Geology, Geography and Geoecology. 2022. Vol. 31 No. 3. P. 575–584. https://doi.org/10.15421/112254
5. Зур'ян О. В. Техніко-економічний та екологічний аналіз впровадження геотермальної теплонасосної системи / О. В. Зур'ян. Екологічні науки. 2023. № 5(50). С. 37–47. https://doi.org/10.32846/2306-9716/2023.eco.5-50.6
6. Zurian O. V. Ecologically safe technologies for the use of geothermal energy. XIV International conference of the open and undervater mining of mineral. 03–07 August, 2017, Varna, Bulgaria. Scientific and technical union of mining, geology and menallurgy. 2017. P. 439–444.

УДК (504.43; 621)

GEOTHERMAL ENERGY OF SPAIN AS A PART OF THE GREEN TRANSITION

Hanna Liventseva

Geosciences Barcelona (GEO3BCN), CSIC
Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028, Barcelona, Spain,
phone: (050) 414 11 80, e-mail: hliventseva@geo3bcn.csic.es

The level of implementation of international, national and local geothermal programs and projects in Spain was analyzed. Examples of practical implementation of projects are provided.

Keywords: *European geothermal energy strategy, geothermal platform, geothermal project.*

ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8203-6282

Abbreviation

EGES	European Geothermal Energy Strategy
PNIEC 2023-2030	National Integrated Energy and Climate Plan of Spain 2023-2030
PRTR	Recovery, Transformation and Resilience Plan
PROENCAT 2050 Catalonia's	Analytical document on the energy transition to climate neutrality
GEOENERGY-CAT 2030	Strategic Plan to promote the energy use of GeoEnergy in Catalonia on the horizon 2030
ICAEN	Catalan Energy Institute
ICGC	Cartographic and Geological Institute of Catalonia
IRENA	International Renewable Energy Agency
GEO3BCN-CSIC	Geociencias Barcelona (GEO3BCN-CSIC)
CAP (MW)	Capacity (MW)
PROD (GWh)	Electricity production (GWh)
CSP	Concentrated solar power
COP	Coefficient of Performance

European and Spanish strategies and plans for the future of geothermal energy

The development of green energy in Spain has become a positive factor, not only providing the economy with sustainable and clean electricity, but also stimulating investment activity. In recent years, Spain has significantly accelerated the production of renewable energy and now has the second largest renewable energy infrastructure in the EU (after Sweden). Wind power capacity, which is the main source of renewable energy in Spain, has doubled since 2008, and solar power capacity has increased eightfold over the same period! President Sanchez called Spain “the driving force of the energy transition on a global scale”. Spain has an extraordinary opportunity to lead the European clean technology revolution, as it has unique geographical, geological and climatic features [1, 2].

The country is systematically and consistently moving towards carbon neutrality. One of the factors in achieving this goal is the use of environmentally friendly geothermal energy. Spain, as part of the EU, adheres to clearly defined goals, which are formulated in strategies and plans by direction.

In January 2024, the European Parliament adopted a resolution in support of EGES (Strategy). The Strategy is supported by 96% of MEPs, but the Strategy document itself is still missing. In theory, this important document calls for all the right things: reducing administrative burdens and promoting investment in construction, industry and agriculture in the EU; harmonizing the insurance scheme to reduce financial risks; supporting transition and coal regions in the transition to geothermal energy; and to encourage Member States to develop national geothermal energy strategies, similar to those of the governments of France, Germany, Poland, Austria, Croatia and Ireland [3].

The PNIEC was established for the period 2021-2030, in response to the challenges posed by the COVID-19 pandemic. In 2023, the Plan, based on the same technical and analytical basis as the previous one, declares the highest climate ambitions in the EU and encourages the green energy transition described in the PRTR. The document is adapted to the new geopolitical changes caused by the russian war against Ukraine. It is expected that 62 GW of wind and 76 GW of solar photovoltaic energy will be installed by 2030. The PNIEC also aims to develop geothermal capacity in Spain: to reach 15 MW of electricity production by 2025, and 30 MW by 2030 [4-7].

Catalonia, as an autonomous community of Spain, has its own relevant policy documents. For example, in May 2024, the ICAEN and the Cartographic and ICGC signed an agreement and began work on the implementation of the GEOENERGIA-

CAT Plan 2030. The document analyzes the potential of geothermal energy in Catalonia and proposes actions and measures to maximize the use of this type of renewable energy.

The plan involves assessing the potential of both types of geothermal energy, both surface and deep, for which Catalonia has a favorable geological situation, and also assesses the geological capacity for storing hydrogen energy. The GEONERGIA-CAT 2030 Plan complies with the provisions of PROENCAT 2050 [8].

Structure of renewable energy in Spain

The installed capacity of renewable electricity sources in the Spanish electricity system increased by 7.70 GW in 2021, by 11.81 GW in 2022, by 6.32 GW in 2023, which made it possible to reach an installed capacity from renewable generation sources in 2023 at 80.14 GW. This represents 62.2% of the total installed capacity. The integration of renewable energy, mainly wind and solar photovoltaic, is a strong impetus for the energy transition and meets the objectives of the PNIEC.

Table 1. Renewable energy in Spain [9]

	2014	**2015**	**2016**	**2017**	**2018**	**2019**	**2020**	**2021**	**2022**	**2023**
Renewable energy share of electricity capacity CAP (%MW)	**44.1**	**44.7**	**45.1**	**46.2**	**46.5**	**49.8**	**52.9**	**55.9**	**60.3**	**62.2**
Renewable energy share of electricity production PROD (%GWh)	**39.6**	**34.6**	**38.1**	**31.9**	**37.9**	**37.0**	**43.2**	**45.8**	**42.0**	
Total renewable energy										
CAP (MW)	**46 850**	**47 708**	**47 798**	**47 948**	**48 283**	**54 601**	**57 313**	**62 011**	**73 818**	**80 136**[1]
PROD (GWh)	**110 269**	**97 090**	**104 652**	**87 944**	**103 905**	**100 988**	**113 783**	**125 747**	**122 960**[2]	
Wind energy										
CAP (MW)	**22 925**	**22 943**	**22 990**	**23 124**	**23 405**	**25 590**	**26 819**	**27 908**	**30 114**	**31 028**[3]
Onshore	22 920	22 938	22 985	23 119	23 400	25 585	26 814	27 903	30 109	31 021
offshore	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7
PROD (GWh)	**52 013**	**49 325**	**48 905**	**49 127**	**50 896**	**55 647**	**56 444**	**62 061**	**62 784**[4]	
Onshore	52 002	49 314	48 894	49 116	50 885	55 636	56 433	62 050	62 773	
Offshore	11	11	11	11	11	11	11	11	11	
Solar energy										
CAP (MW)	**7 001**	**7 008**	**7 017**	**7 027**	**7 068**	**11 111**	**12 440**	**16 019**	**25 615**	**31 016**[5]
	4 697	4 704	4 713	4 723	4 764	8 807	10 136	13 715	23 311	28 712
CSP	2 304	2 304	2 304	2 304	2 304	2 304	2 304	2 304	2 304	2 304
PROD (GWh)	**13 672**	**13 859**	**13 643**	**14 397**	**12 744**	**15 103**	**20 667**	**27 098**	**35 764**[6]	
Solar photovoltaic	8 218	8 266	8 064	8 514	7 877	9 420	15 675	21 922	31 228	
CSP	5 455	5 593	5 579	5 883	4 867	5 683	4 992	5 176	4 536	
Bioenergy										
CAP (MW)	**1 032**	**1 035**	**1 037**	**1 045**	**1 057**	**1 112**	**1 264**	**1 278**	**1 279**	**1 279**
PROD (GWh)	**5 414**	**5 764**	**5 689**	**6 078**	**5 911**	**5 572**	**6 138**	**6 943**	**6 799**	
Solid biofuels and renewable waste										
CAP (MW)	**790**	**789**	**789**	**793**	**793**	**839**	**989**	**1 001**	**1 001**	**1 001**
PROD (GWh)	**4 507**	**4 782**	**4 783**	**5 137**	**4 976**	**4 655**	**5 244**	**5 950**	**5 796**	
Renewable municipal waste										
CAP (MW)	**117**	**117**	**117**	**121**	**121**	**121**	**121**	**133**	**133**	**133**
PROD (GWh)	**686**	**768**	**735**	**772**	**755**	**770**	**703**	**855**	**864**	
Other solid biofuels										
CAP (MW)	**673**	**672**	**672**	**672**	**672**	**718**	**868**	**867**	**867**	**867**
PROD (GWh)	**3 821**	**4 014**	**4 048**	**4 365**	**4 221**	**3 885**	**4 541**	**5 095**	**4 932**	
Liquid biofuels										
CAP (MW)					**6**	**6**	**6**	**6**	**6**	**6**
PROD (GWh)					**12**	**13**	**13**	**14**	**13**	
Biogas										
CAP (MW)	**243**	**245**	**248**	**251**	**258**	**267**	**269**	**271**	**272**	**272**
PROD (GWh)	**907**	**982**	**906**	**941**	**923**	**904**	**881**	**979**	**990**	

[1] Second place in Europe after Germany (166 939 MW); [2] Fourth place in Europe after Germany (251 087 GWh), Norway (143 461 GWh) and the UK (135 159 GWh); [3] Second place in Europe after Germany (69 459 MW); [4] Third place in Europe after Germany (124 816 GWh) and the UK (80 257 GWh)

[5] Second place in Europe after Germany (81 739 MW); [6] Second place in Europe after Germany (60 304 GWh)

Data on geothermal energy in Spain is not covered in Renewable Energy Statistics 2024.

Spain, together with Germany, Finland, France, Sweden, and the United Kingdom, is among the ten countries with the highest wind power capacity and growth rates, accounting for almost 60% of the annual number of wind turbines in Europe [10].

Spain leads the region with a solar photovoltaic capacity increase of 9.6 GW in 2022 and 5.4 GW in 2023. But Spain, which has the largest CSP capacity in the world, has not added any new CSP capacity since 2013, mainly due to pricing disagreements between the government and industry and uncertainty about grid access opportunities [10].

Current geothermal projects in Spain

The project Evaluation of the* geothermal *potential of the Alto Guadiana area based on tectonic and hydrogeological observations aims to improve knowledge about geothermal energy in Spain as part of the energy transition. Geothermal resource development projects require large initial investments, mainly due to the cost of drilling, which increases significantly with depth. The analysis and integration of this data will allow the creation of a 3D geological model. Using thermal calculation software, the temperature distribution, temperature gradients and heat exchange regime of the region will be determined. These results will allow the development of geothermal potential maps and recommendations for the exploitation of geothermal resources in the Upper Guadiana. In addition, the aim is to create a methodology for its application in other regions of Spain and to determine the geothermal potential of the entire Spanish territory.

Grupo Hunosa geothermal district heating project. The Spanish company Hunosa Group successfully implemented the Pozo Barredo geothermal project, using mine water and thermal energy from old, inactive coal mines.

The Asturian Coal Mines (Central Coal Basin) are a huge underground reservoir filled with water as a result of over a century of intensive mining. After the cessation of mining and pumping of the water, the entire area naturally flooded. The extraction of mine water is facilitated by two submersible pumps with a total capacity of 2 MW, located in the vertical shaft of the mine. The temperature of the pumped water is 23°C and the heat pumps raise it to 85°C with a high COP, allowing integration/intake into different types of buildings. Each pump has a nominal flow of 330 m3/h and a power of 83 kW.

The total length of the submerged well is 350 m. Network capacity: 6 MW. Savings in consumer bills of up to 10-15% compared to the prices that existed when using natural gas [11]. The design capacity of the chillers allows new consumers to be connected to the heating network.

Fig. 1. Pozo Barredo project (Asturian coal mines, Spain) [12]

The second facility, Pozo Fondón, a hybrid, combining geothermal and biomass energy, was commissioned in May 2022 and can cover the need for 3.3 GWh per year. It serves a wellness and sports center, a hotel, a retirement home and a residential building with 45 apartments.

Construction of a new geothermal plant in Valencia – air conditioning and cooling project. Low-enthalpy geothermal energy has been chosen to modernize the air conditioning system of the Science Museum of the City of Arts and Sciences of Valencia. It will be the largest such facility in Spain . The installed capacity is over 6.5 MW (the capacity of the cascade heat pumps will reach 4 MW; 2.5 MW will be obtained through the direct use of the aquifer).

The geothermal plant will connect the engine rooms of the Science Museum to the natural aquifers of the earth through a system of pipes that will recirculate the water used to heat the building. In summer, this water absorbs the excess heat produced by the air conditioners and transfers it to the water in the subsoil, which has the same temperature all year round, around 20 degrees, returning the cooled water to the museum. In winter, the opposite effect will be achieved, as the water will gain temperature from the subsoil to transfer heat to the air conditioning system. To do this, the organization designed a network of 45 small-diameter wells, over 30 centimeters, in the area adjacent to the Museo de las Ciencias. The project aims to achieve a building temperature of 27°C in summer and 19°C in winter.

Along with the main geothermal equipment, photovoltaic glass cladding will be installed on the external overhangs of the building's north and south facades as energy support, as well as devices for charging electric vehicle batteries. In total, the Science Museum will save 1,013,000 kWh per year through geothermal air conditioning. The project is funded by the Next Generation EU Funds of the EU [13].

There are interesting scientific programs implemented within the framework of the CSIC activities. For example, the institute, Geosciences Barcelona (GEO3BCN-CSIC), is going to be a pioneer for the installation of a hybrid geothermal and solar facility for heating and air conditioning in the CSIC premises.

This investment was initiated by the CSIC, proposing the installation of geothermal and photovoltaic facilities. 25 wells of 120 linear meters each (double probe, diameter 32), 40 photovoltaic panels of 475 W each (total power 19 kW). In a large city, even as “windy” as Barcelona, the installation of wind turbines is considered impractical due to the impact on the environment.

Fig. 2. Preliminary location of the geothermal and photovoltaic energy installation (Geosciences Barcelona (GEO3BCN-CSIC), Barcelona, Spain)

Conclusions

Geothermal energy differs from other renewable sources mainly due to the uncertainty associated with the definition of the geothermal resource at the initial stage of projects. However, once the resource has been found and confirmed that its exploitation is technically and economically viable, and the geothermal plant is put into operation, the cost of electricity produced is one of the most competitive of all renewable sources (LCOE from 0.04 to 0.07 €/kWh) according to IRENA. These two different factors highlight the importance of developing mechanisms that help reduce this initial inherent risk, as has been done in other European countries where geothermal energy is successfully implemented [14].

REFERENCES

1. Why Spain's economy is called the best in the world - BBC News Ukraine
2. https://www.bbc.com/mundo/articles/c722y5k2k6wo#:~:text=Potencia%20en%20renovables&text=Esto%20convierte%20a%20Espa%C3%B1a%20en,transici%C3%B3n%20energ%C3%A9tica%20a%20escala%20global%22 .
3. https://www.egec.org/media-publications/press-release-the-european-parliament-overwhelmingly-endorses-a-call-for-an-eu-geothermal-strategy/
4. https://www.miteco.gob.es/es/prensa/pniec.html
5. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/prensa/20240924_NdP_El_Gobierno_aprueba_la_actualizaci%C3%B3n_del_PNIEC_2023.pdf
6. https://www.miteco.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/2024/septiembre/el-gobierno-aprueba-la-actualizacion-del-plan-nacional-integrado.html
7. https://solida.com.es/en/the-spanish-government-approves-pniec-update-with-new-targets-for-2030/
8. https://icaen.gencat.cat/es/detalls/noticies/20240521_noticia-signatura-cartografic
9. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Jul/IRENA_Renewable_Energy_Statistics_2024.pdf
10. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2023_Supply_Factsheet-Europe.pdf
11. https://www.geothermalstories.org/stories1/Blog%20Post%20Title%20One-s26wg-rbn5r-ldbc7-6sfng-r6dz8-sy2he-kebg3-aachy-52956
12. https://geotermiaonline.com/14073/geoplat-lanza-el-portal-geoenergia-para-impulsar-el-desarrollo-del-sector/
13. https://blog.geoplat.org/en/2024/08/05/valencia-tendra-la-mayor-planta-geotermica-de-espana-hasta-la-fecha/
14. https://icaen.gencat.cat/es/detalls/publicacio/PROENCAT-2050-00001

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ЕКОНОМІКИ КРАЇНИ

Е. П. Пастушенко

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна
тел. 0675200375, e-mail:pastushenko@vde.com.ua

У роботі проаналізовано різні варіанти практичного застосування теплових насосів. Розглянуто теплові насоси з різними джерелами теплової енергії, а також з різними варіантами споживачів тепла. Висвітлено нові, нетипові випадки застосування теплонасосного обладнання для виконання завдань з осушення.

Ключові слова: *енергоефективність, теплові насоси, осушення на базі теплових насосів.*

Вступ. Загальні засади застосування теплових насосів

Розглянуто теоретичні варіанти з впровадження теплових насосів з різноманітними варіантами джерела теплової енергії. Також розглянуто різноманітні варіанти приладів, завдяки яким здійснюється споживання згенерованої тепловим насосом енергії. Надано рекомендації щодо вибору оптимальних рішень під час таких застосувань.

Варіанти застосування теплових насосів на діючих об'єктах

1. Геотермальний тепловий насос для опалення, охолодження та підігріву води у виробничо-офісному приміщенні в м. Київ. Особливості впровадження
2. Теплові насоси для Київводоканалу з джерелом тепла у вигляді каналізаційних стічних вод
3. Тепловий насос для станції аерації Чорноморськводоканалу
4. Тепловий насос – замінник градирні для АТ «Мотор Січ»
5. Тепловий насос з джерелом тепла у вигляді повітря, що видаляєтьсячерез повітроводи багатоповерхової будівлі
6. Тепловий насос-осушувач для аквапарку «Карпатія» в м. Мукачеве

Перспективи

Застосування стандартних теплонасосних рішень в сьогоднішніх умовах не відповідає вимогам часу. Ринок теплових насосів дуже конкурентний. Є багато виробників, які працюють у тій самій ніші; це призводить до посилення конкуренції, що в своєю чергою веде до зменшення ціни на теплові насоси. Це доволі небезпечний шлях, особливо якщо враховувати, що дедалі частіше конкурувати доводиться з китайськими виробниками, в яких обсяги виробництва теплових насосів – тисячі щодня. Це істотно знижує собівартість обладнання.

Щоб уникнути таки конкурентних ринків, фахівці нашої компанії зробили наголос на індивідуальних рішеннях, де тепловий насос – це один з ланцюжків енергоощадного рішення для замовника.

Висновки

Постійний процес удосконалення технологій сприяє пошуку нових сфер для застосування теплових насосів. Станом на зараз маємо ситуацію, коли природній газ продається на дотаційній основі. При цьому вартість електроенергії постійно підвищується. Це призводить до перекосу в ціноутворенні на енергоносії, отримані від різних джерел. І навіть економічно доцільна технологія застосування теплових насосів у всьому світі, у нашій країні не працює.

Саме тому наша компанія намагається знаходити нестандартні рішення, які мають швидші терміни окупності.

До того ж поступовий шлях до використання лише природних холодоагентів вимагає постійного вдосконалення та пошуку нових технічних рішень для застосування теплових насосів.

УДК 624.482

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЛІКВІДОВАНИХ НАФТОГАЗОВИХ СВЕРДЛОВИН ДЛЯ ВИДОБУТКУ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ

А. А. Барило[1], О. В. Бачеріков[2], І. В. Лобанова[3]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України
102094, м. Київ, вул. Г. Хоткевича, 20А,
тел./факс 206-28-09, e-mail: geotherm@ukr.net

В Україні триває аудит ліквідованих нафтогазових свердловин з метою оцінки можливостей видобутку залишкових запасів вуглеводнів. Доцільно розглянути використання виведених з експлуатації свердловин для енергетичних цілей. Важливими чинниками є технічний стан свердловини, економічна доцільність відновлення та участь територіальних громад.

Ключові слова: *ліквідовані нафтогазові свердловини, геотермальні свердловини, вимоги до свердловин*

PROSPECTS OF USING LIQUIDATED OIL AND GAS WELLS FOR GEOTHERMAL RESOURCES PRODUCTION

A. Barylo[1], O. Bacherikov[2], I. Lobanova[3]

Institute of renewable energy of NAS of Ukraine
G. Khotkevych str., 20A, 02094, Kyiv, Ukraine
Phone/fax: +38-044-206-28-09 e-mail: geotherm@ukr.net

In Ukraine, an audit of decommissioned oil and gas wells is underway to assess the potential for extracting remaining hydrocarbon reserves. It is advisable to consider repurposing abandoned wells for energy purposes. Key factors include the technical condition of the well, the economic feasibility of restoration, and the involvement of local communities.

Keywords*: liquidated oil and gas wells, geothermal wells, well requirements*

ORCID: 0000-0001-7981-6464[1]

Використання ліквідованих нафтогазових свердловин для видобутку геотермальної енергії є перспективним напрямом, який сприяє підвищенню ефективності місцевих енергосистем, раціональному використанню існуючого фонду свердловин, зниженню капітальних витрат геотермальних проєктів і скороченню термінів їх реалізації. Такі проєкти успішно реалізовано в США, Німеччині, Швейцарії та інших країнах [1].

В Україні, згідно із загальнодоступними даними Державної служби геології та надр України, у реєстрі нафтогазових свердловин станом на 2024 рік перебуває 11 072 свердловини, з них 2 891 свердловина має статус ліквідованих, ще 76 перебувають у стані ліквідації [2]. Реально ліквідованих свердловин значно більше.

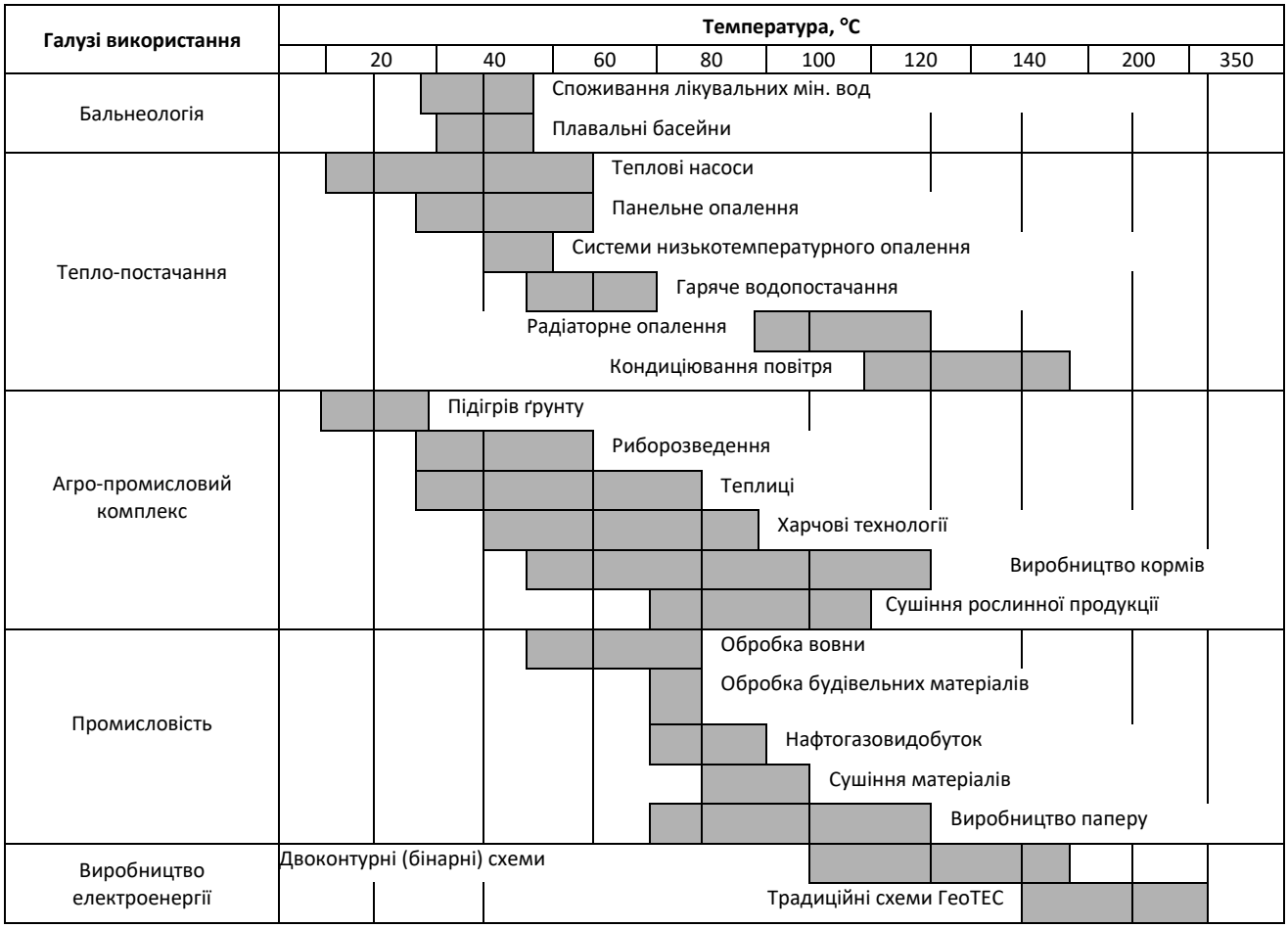
Зараз в Україні проводяться заходи щодо аудиту та реконструкції ліквідованих нафтогазових свердловин з метою видобутку залишкових запасів. Компанія NADRA SERVICES здійснює комплексні проєкти, включно з аналізом технічного стану свердловин, оцінкою можливостей відновлення видобутку із застосуванням сучасних технологій стимулювання [3]. Важливо проводити аудит з урахуванням перспектив використання свердловин, непридатних для вилучення залишкових запасів вуглеводнів, для видобутку геотермальних ресурсів.

З енергетичною метою можуть бути використані ліквідовані нафтогазові свердловини, які вичерпали свої запаси та заводнилися, а також ті, в яких не підтвердилися прогнозні запаси вуглеводнів, або ті, в яких виявлених запасів недостатньо для комерційного видобутку [4].

Сучасні геотермальні технології дозволяють ефективно використовувати ресурси з різними параметрами для різних цілей. У табл. 1 наведено напрями застосування геотермальних ресурсів залежно від температури підземних вод. Можливі варіанти використання «сухих» свердловин.

Тому головним фактором у використанні ліквідованих свердловин є зацікавленість їх власників та участь територіальних громад. Істотне значення також мають технічний стан свердловини та вартість її відновлення, що впливає на рентабельність проєкту. Важливо враховувати, що використання свердловин не повинно заважати розробці нафтогазових покладів, тобто вони мають перебувати за межами діючого покладу. Для кожної конкретної свердловини може бути розроблена індивідуальна технологія використання залежно від її параметрів [5].

Таблиця 1. Напрями енергетичного використання геотермальних ресурсів залежно від їх температури



ПОСИЛАННЯ

1. Robert A. Caulk, Ingrid Tomac. Reuse of abandoned oil and gas wells for geothermal energy production. Renewable Energy. Vol. 112. P. 388–397. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.042
2. Дані реєстру нафтових і газових свердловин - Набори даних - Портал відкритих даних. Головна сторінка - Data.gov.ua. URL: https://data.gov.ua/dataset/e0795f5d-77f7-454a-94a3-c6e6cafff741/resource/7a4993a8-1965-44d2-96d8-e67d947445b7?filter=for_month (дата звернення: 12.03.2025).
3. https://nadraservices.com/ua/activity/green-transition?utm_source=chatgpt.com
4. «Правила розробки нафтових і газових родовищ»: затверджені наказом Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 15.03.2017 № 149.
5. Відновлювані джерела енергії: монографія / [С. О. Кудря, Н. М. Мхітарян, В. Ф. Рєзцов та ін.]; за ред. С. О. Кудрі. ІВЕ НАН України. К.: ТОВ «НВТ «Інтерсервіс», 2020. 392 с.

УДК 620.92

ДЕРЖАВНА ПІДТРИМКА ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У СИСТЕМАХ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ. СВІТОВИЙ ДОСВІД

І. С. Соколовська[1], О. І. Тесленко[2]

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (050) 223-40-07, e-mail: teslenko1961@gmail.com

Світовий досвід показав, що державна фінансова підтримка відіграє вирішальну роль у впровадженні теплових насосів у системах теплопостачання.

Ключові слова: *теплові насоси, система теплопостачання, субсидії, податкові стимули.*

GOVERNMENT SUPPORT FOR THE IMPLEMENTATION OF HEAT PUMP TECHNOLOGIES IN HEATING SYSTEMS. WORLD EXPERIENCE

I. Sokolovska[1], O. Teslenko[2]

General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,
172 Antonovycha Str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (050) 223-40-07, e-mail: teslenko1961@gmail.com

World experience has shown that state financial support plays a decisive role in the implementation of heat pumps in heating systems.

Keywords: *heat pumps, heating system, subsidies, financial support..*

ORCID: [1]0000-0003-1959-9837; [2]0000-0002-37725-5991

У багатьох країнах світу діють програми фінансової підтримки впровадження різних типів теплових насосів (ТН). Так, у Великій Британії доступні гранти за програмами, чинними як у країні в цілому, так і в окремих її регіонах: Boiler Upgrade Scheme – на встановлення повітряних та геотермальних ТН, включно з високотемпературними ТН, в Англії та Уельсі; Energy Company Obligation Scheme (ECO4) – для домогосподарств з низькими доходами в Англії, Шотландії та Уельсі; Warmer Homes Scotland – у Шотландії; Home Energy Scotland Scheme – безпроцентні позики у Шотландії; Nest Scheme – держава покриває всі витрати на повітряні ТН в Уельсі; 0 % VAT – заощадження до £750 на витратах на встановлення ТН по всій країні до 2027 р. [1]. Для прискорення впровадження ТН уряд Великої Британії у жовтні 2023 р. збільшив гранти на 50 % до £7500 (8692 євро) [2, 3].

У США прийнято Закон про зниження інфляції (Inflation Reduction Act, IRA) [4], згідно з яким для оплати ТН введено пільги з податку на прибуток, а також розроблено програму “High-Efficiency Electric Home Rebate Program” щодо прямих знижок (субсідій) у торгових закладах для ТН, які залежать від доходу домогосподарства. У деяких містах і штатах США є відповідні власні програми, а тож розмір субсідій може бути різним [5–7].

У Канаді гранти на повітряні та геотермальні ТН надаються в межах програми Canada Greener Homes Initiative, причому все обладнання має бути придбано в Канаді. ТН типу «повітря–вода» не підпадають під дію зазначеної програми. Деякі гранти недоступні в різних провінціях, де існують свої правила фінансової підтримки [8].

У Китаї з семи програм щодо централізованого опалення (2017) у Північному Китаї чотири передбачають застосування різних типів ТН, а саме: водяні WSHPP (Water-Source Heat Pump Program), повітряні ASHPP (Air-Source Heat Pump Program), повітряні з теплоакумуляторами ASHPP-S (Air-Source Heat Pump with Latent Heat Storage Program), грунтові GSHPP (Ground-Source Heat Pump Program) [9].

В Японії згідно з програмою Energy Conservation Subsidies Package (2022/2023) надавались субсидії на ТН, причому в 2023 р. їх збільшено удвічі, до 100 000 ієн/од. ТН [10]. На сьогодні субсидії поширюються на ТН у межах проєктів з енергозбереження, а також високоефективні ТН у промисловому та комерційному секторах [11].

У країнах ЄС чинні різні види та програми підтримки ТН, наприклад: Raus aus Öl und Gas (Австрія), Mijn VerbouwPremie (Бельгія, Фландрія), New Green Savings Programme(Чехія), MaPrimeRenov and Coup De Pouce chauffage (Франція), Die bisherige Förderung des Bundesamtes für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) (Німеччина),

Heat Pump system grant (Ірландія), ISDE-subsidy (Нідерланди), Enovatilskuddet (Enova subsidy) (Норвегія), Clean air, My Heat (Польща), Programa de Apoio a Edifícios Mais Sustentáveis (Португалія), Green for households (Словаччина), Energy reduction program, (Іспанія), MyClimate and subsidies per Canton (Швейцірія) тощо [12].

Водночас, як це показав досвід деяких країн, зокрема Італії, де з 2020 до 2023 р. за програмою Superbonus 110 per cent надавались суттєві податкові пільги та субсидії для інвестування в модернізацію будівель, припинення фінансової підтримки впровадження ТН призводить до різкого скорочення попиту на ТН [13]. Аналогічно в Китаї, де за програмою Northern District Winter Clean Heating Plan (2017–2021) та відповідними робочими програмами надавались субсидії на повітряні ТН, а також згідно з 13-м п'ятирічним планом (13th Five-Year Plan (2016–2020)) – субсидії на геотермальні ТН, однак на сьогодні немає субсидій для ТН, що призвело до негативних ринкових тенденцій з 2022 р. [14–16].

Отже, світовий досвід показав, що державна фінансова підтримка ТН безпосередньо впливає на масштаб і терміни впровадження різних теплонасосних технологій у системах теплопостачання.

ПОСИЛАННЯ

1. Heat Pump Grant UK: How to Apply & Savings. URL: https://www.greenmatch.co.uk/heat-pumps/grants (дата звернення: 03.03.2025)
2. Yanatma S.. Can you get government subsidies for heat pumps? Here are all the grants available in Europe. URL: https://www.euronews.com/green/2024/01/21/heat-pumps-government-subsidies-in-europe-are-making-green-tech-more-affordable (дата звернення: 03.03.2025)
3. Boiler Upgrade Scheme. URL: https://energysavingtrust.org.uk/grants-and-loans/boiler-upgrade-scheme/ (дата звернення: 03.03.202521)
4. Inflation Reduction Act of 2022, H.R. 5376, 117th Congress. Public Law 117-169.
5. Davis L.W. The Economic Determinants of Heat Pump Adoption. NBER Working Paper No. 31344. June 2023, Revised July 2023. 52 p. URL: http://www.nber.org/papers/w31344 (дата звернення: 03.03.2025)
6. Federal tax credits. URL: https://environmentamerica.org/center/resources/common-questions-and-answers-about-heat-pumps/ (дата звернення: 03.03.2025)
7. Heat pumps: how federal tax credits can help you get one / Environment America Research & Policy Center. URL: https://environmentamerica.org/center/resources/heat-pumps-how-federal-tax-credits-can-help-you-get-one/ (дата звернення: 03.03.2025)
8. Eligible retrofits and grant amounts / Government of Canada. URL: https://natural-resources.canada.ca/energy-efficiency/homes/canada-greener-homes-grant/start-your-energy-efficient-retrofits/plan-document-and-complete-your-home-retrofits/eligible-grants-for-my-home-retrofit/23504#s5 (дата звернення: 03.03.2025)
9. Huang C., Qin Y., Wong R. Cost Competitiveness of Clean Energy Heating Electrification2 Programs in Northwest China. September 28, 2021. LLNL-JRNL-827189. 13 p.
10. The Evolution of Energy Efficiency Policy to Support Clean Energy Transition / Ministry of Economy, Trade and Industry (METI, Japan). URL: https://energyefficiencyhub.org/wp-content/uploads/2024/01/EMAK12-Ministry-of-Economy-Trade-and-Industry-Japan-The-Evolution-of-Energy-Efficiency-Policy-to-Support-Clean-Energy-Transition.pdf (дата звернення: 03.03.2025)
11. The role of heat pumps towards decarbonization – Japan’s policy, market and technology (2). URL: https://enerteam.org/the-role-of-heat-pumps-towards-decarbonization-japans-policy-market-and-technology-2.html (дата звернення: 03.03.2025)
12. Subsidies for residential heat pumps in Europe. EHPA, 32 p. URL: https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2023/03/EHPA_Subsidies-for-residential-heat-pumps-in-Europe_FINAL_April-2023.pdf (дата звернення: 03.03.2025).
13. Heat pumps in Italy: subsidies exhausted, market collapses. URL: https://blackout-news.de/en/news/heat-pumps-in-italy-subsidies-exhausted-market-collapses/ (дата звернення: 03.03.2025)
14. Lingyan Y., Wei X. The Development of Heat Pump Technology in China. China Academy of Building Research. URL: https://heatpumpingtechnologies.org/wp-content/uploads/2021/07/the-development-of-heat-pump-technology-in-china.pdf (дата звернення: 03.03.2025)
15. HVAC 2030: China. URL: https://www.bsria.com/uk/news/article/hvac_2030_findings_china/ (дата звернення: 03.03.2025)
16. The Future of Heat Pumps in China. URL: www.iea.org (дата звернення: 03.03.2025)

POTENTIAL OF BIOMETHANE PRODUCTION AND USE IN AGRICULTURE

Kęstutis Navickas[1], Kęstutis Venslauskas[2]

Vytautas Magnus University
K. Donelaičio Str. 58, LT-44248 Kaunas, Lithuania,
phone: +37068786826, e-mail: kestutis.navickas@vdu.lt

Biogas and biomethane are sustainable, on-demand and flexible energy sources that provide socio-economic and environmental benefits, which help abate emissions across the whole value chain. Their utilization is crucial to expedite the reduction of GHG emissions in several sectors, such as agriculture, buildings, industry and transport. The REPowerEU Plan includes a 35 bcm/year indicative target for biomethane to be reached by 2030, which is equal to 10% of the EU's total gas demand [1]. By 2050, the biogas and biomethane production potential can reach up to 167 bcm, which represents 40% of the total gas consumption of the EU in 2021 [2].

The task of this research was to evaluate the biomass potential of Lithuanian agriculture for the production of biomethane and its use for heavy transport. Solving the tasks the following limitations are used for the assessment of biomethane production potential: size of cattle farms - more than 100 heads on a farm, size of pig farms - more than 1000 heads on a farm, size of poultry farms - more than 10000 birds on a farm and potential of cereal straw for biomethane production - 10%, 20%, 30% from total yield. The systematic databases of Statistics Lithuania were used for this study [3]. The potential for biomethane production on selected farms and the efficiency of its use in farm heavy transport were also assessed.

It was found that the country's biomethane production potential from cattle, pig and poultry manure reaches 124.4 million m^3 or 1.24 TWh. Biomethane potential from cattle farms is in the range of 97 million m^3 or 0.97 TWh, from piggeries – 11 million m^3 or 0.11 TWh, and 16 million m^3 or 0.16 TWh from poultry farms. Biomethane production potential from spring and winter straw (using 10-30 % of total yield) varies from 55 to 166 million m^3 or 0.55-1.66 TWh.

Investigation of the possibilities for the selected farms to produce biomethane for heavy transport shows that manure-generated farms are able to replace diesel fuel with biomethane. However, only medium productivity (higher than 150 m^3/h) of biomethane production is economically viable. The production and use of biomethane for heavy transport instead of diesel has great potential for reducing the carbon footprint of farms. On selected cattle farms, the carbon dioxide reduction potential of replacing diesel with biomethane was 400 - 17,000 t per year, depending on the size of the farm.

Key words: *biogas, biomethane, energy potential, sustainability, agricultural biomass.*

ORCID: [1]0000-0001-5990-0773; [2]0000-0001-8200-1442

REFERENCES

1. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: REPowerEU Plan, European Commission, Brussels. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM%3A2022%3A230%3AFIN (2022).
2. EBA 2023. "EBA Statistical Report 2022". Brussels, Belgium, November 2023.
3. Lietuvos statistikos departamentas. Žemės ūkio augalų derlius. https://osp.stat.gov.lt/statistiniu-rodikliu-analize#/

УДК 621.311.25

ПЕРЕОБЛАДАННЯ БІОГАЗОВИХ УСТАНОВОК В ЄС ЯК ЗАСІБ ПРИСКОРЕННЯ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ РЕЗИЛЬЄНТНОСТІ ЄВРОПЕЙСЬКОГО КОНТИНЕНТУ

О. В. Савицький[1], О. А. Дячук[2]

Державна установа «Інститут економіки та прогнозування НАН України»
вул. Панаса Мирного, 26, м. Київ, 01011, Україна,
тел.: (099) 910-47-82, e-mail: olehsavitskyi@gmail.com

На основі аналізу галузевих статитичних даних ЄС оцінено технічний потенціал для реалізації проєктів з виробництва біометану, низьковуглецевої електроенергії та скорочення викидів парникових газів, який може бути реалізований спільно країнами ЄС та Україною. Розгляуто можливість переобладнання існуючих біогазових установок в ЄС на заводи з виробництва біометану з одночасною передачею демонтованих когенераційних установок Україні для реалізації прєектів утилізації викидів метану та розвитку розподіленої генерації.

Ключові слова: *біометан, метанація, біогаз, когенераційні установки, розподілена генерація, утилізація метану.*

CONVERSION OF BIOGAS PLANTS IN THE EU AS A MEASURE TO ACCELERATE DECARBONIZATION AND INCREASE THE RESILIENCE OF THE EUROPEAN CONTINENT

O. Savytskyi[1], O. Dyachuk[2]

Institute for Economics and Forecasting of the National Academy of Sciences of Ukraine,
26 Panasa Myrnoho Str., Kyiv, 01011, Ukraine,
tel.: (099) 910-47-82, e-mail: olehsavitskyi@gmail.com

Based on the analysis of EU sectoral statistical data, the technical potential for implementing projects for the production of biomethane, low-carbon electricity, and reduction of greenhouse gas emissions, which can be implemented jointly by the EU countries and Ukraine, was assessed. The possibility of converting existing biogas plants in the EU into biomethane plants with the simultaneous transfer of dismantled cogeneration units to Ukraine for the implementation of projects for the utilization of methane emissions and the development of distributed generation was considered.

Key words: *biomethane, methanation, biogas, cogeneration units, distributed generation, methane utilization.*

ORCID: [1]0000-0002-9093-9032; [2]0000-0002-3281-6536.

На основі аналізу галузевих даних оцінено технічний потенціал для спільного нарощування виробництва біометану в Європейському Союзі (ЄС) і утилізації викидів метану та розвитку розподіленої генерації в Україні. Особливу увагу приділено перевагам, які можуть бути отримані від двостороннього співробітництва ЄС та України у сфері інтенсифікації процесів декарбонізації та резільєнтності енергетичних систем.

За даними Європейської Біогазової Ассоціації, кількість заводів з виробництва біометану в ЄС зросла з 1023 до 1548 за останні 4 роки, досягнувши в 2024 році встановленої потужності 6,4 млрд м³ на рік [1]. Однією з цілей проголошеного в 2022 році плану REpowerEU є досягнення обсягів виробництва у 35 млрд м^3 біометану на рік до 2030 року, а оцінена потреба в інвестиціях на цей період становить 37 млрд євро [2]. Тобто ЄС необхідно збільшити виробництво біометану майже у шість разів, що видається надзвичайно складним завданням.

Водночас в ЄС кількість установок, які виробляють біогаз і використовують його на місці (без очищення до біометану) для виробництва електроенергії, перевищує 20 тис. Пік виробництва електроенергії біогазовими установками в ЄС був пройдений у 2021 році й становив 56,7 млрд кВт·год [3]. Якщо припустити, що середній вміст метану в біогазі становить 55 % та відповідає нижчій теплотворній здатності біогазу (21,5 МДж/м³), а також що середня електрична ефективність когенераційних установок (КГУ) приблизно 38 %, тоді загальний обсяг виробництва сирого біогазу в 2021 році в ЄС мав становити щонайменше 25 млрд м³. Реальні обсяги виробництва біогазу можуть бути більшими, враховучи споживання біогазу для власних потреб підприємств і те, що частина біогазових заводів в ЄС не продають вироблену електроенергію з біогазу в загальну електромережу.

Зважаючи на те, що вміст CO_2 у сирому біогазі в середньому становить 44–45 % за об'ємом, а інші домішки становлять менше 1 %, використання технологій метанації CO_2 може значно підвищити потенціал виробництва біометану при переробці біогазу [4]. Водночас якщо для переробки CO_2 на додаткові обсяги метану буде використовуватися електроенергія з інших відновлюваних джерел (СЕС, ВЕС, ГЕС тощо), тоді можливим буде досягнення так званих негативних викидів, тобто технологічного поглинання вуглецю, на додаток до його поглинання при зростанні біосировини (рослин). Отже, це може дозволити ЄС переробити CO_2 (без викидання в атмосферу), що міститься в біогазі, в обсязі 22,1 млн т на рік, що відповідає 11,2 млрд м³ біогенного CO_2 на рік. Відповідно до балансу реакції Сабатьє (1), при переробці CO_2, що міститься в боігазі, можна отримати аналогічний об'єм метану.

$$CO_2 + 4H_2 = CH_4 + 4H_2O \quad (1)$$

Основний паливний компонент для визначеного вище обсягу біогазу – це 13,8 млрд м³ метану. Таким чином, за рахунок модифікації, переобладнання існуючих в ЄС біогазових заводів з виробництва біогазу на виробництво біометану, можна отримати близько 25 млрд м³ біометану на рік, що забезпечить досягнення 2/3 поставленої в REpowerEU цілі та дозволить скоротити потреби в імпорті викопного газу до ЄС приблизно на 8 % обсягів 2021 року. Техінчний потенціал скорочення викидів парникових газів (ПГ) від заміщення 25 млрд м³ природного (викопного) газу біометаном становить щонайменше 49,1 млн т CO_2 (не враховуючи витоки метану), оскільки біометан вважається кліматично нейтральним паливом через належність органічної сировини до природного циклу обігу вуглецю.

Важливими перевагами виробництва біометану є можливість прямого заміщення ним викопного газу для використання гнучкими потужностями газової генерації, які в ЄС застосовуються для балансування електроенергетичної системи з великою і зростаючою часткою вітрової та сонячної енергетики, але також й у високотемпературних промислових процесах. Завдяки вищій ефективності використання біометану, підвищенню гнучкості та оптимізації роботи енергосистеми можливо досягнути додаткового скорочення використання викопного газу та викидів CO_2. За попередньою оцінкою, оптимізація режимів генерації електроенергї та підвищення паливної ефективності може дозволити скоротити споживання мережевого газу на 7,5 млрд м³ на рік і досягти скорочення викидів на додаткові 14,7 млн т CO_2. З огляду на це сумарний технічний потенціал для скорочення викидів CO_2 при переобладнанні біогазових установок в ЄС під виробництво біометану оцінюється у 63,8 млн т CO_2-екв. на рік.

Програма переобладнання біогазових установок в ЄС також може відкрити можливості для розширення співпраці в енергетичному секторі між Україною та ЄС. КГУ з біогазових заводів ЄС можуть бути передані в Україну зі значним дисконтом (як вживане обладнання) або у вигляді донорської допомоги. Вони можуть бути використані для різних цілей посилення енрегетичної безпеки та резільєнтності української енергосистеми, а також для утилізації метану на вугільних шахтах, у нафтогазовому сеторі, на полігонах твердих побутових відходів [8], в агропромисловому комплексі [7] та у проєктах з очищення стічних вод. Це дозолить значно збільшити обсяги вловлювання метану в Україні, загалом зменшити викиди ПГ та замістити потужності централізованої теплової генерації, зруйновані внаслідок війни росії проти України. Переобладнавши лише 8 % біогазових заводів (1600), ЄС може передати Україні обладнання КГУ (з середньою одиничною потужністю КГУ 500 кВт) сумарно на 800 МВт. Приймаючи середній коефіцієнт встановленої потужності (КВВП) КГУ на рівні 80 %, це дозволить виробляти близько 5,5 млрд кВт·год електроенергії на рік. Утилізація метану, як енергетичного ресурсу, так і парникового газу, принаймні від сміттєзвалищ, нафтогазового та вугільного секторів, є надзвичайно вигідним через значні обсяги його викидів в Україні [5, 6]. Захопленню та утилізації наявних в Україні викидів метану в обсязі 1,45 млрд м³ або 1,04 млн т [9] відповідє технічний потенціал скорочення викидів ПГ на 29,1 млн т CO_2-екв (використовуючи коефіцієнт потенціалу глобального потепління 28). Заміщення викопного палива утилізованим метаном дає додаткові 2,8 млн т скорочення викидів CO_2. Сумарно потенціал скорочення викидів ПГ може становити 31,9 млн т CO_2-екв., що становить 9,3% загальних в Україні в 2021 році. Економічний ефект від цього може становити від 957 млн грн (21,3 млн євро) до 93,3 млрд грн (2,1 млрд євро) за чинної ставки оподаткування викидів CO_2 в Україні 30 грн/т, та 65 євро/т у системі торгівлі викидів ЄС у 2024 році, відповідно.

Для детальнішого вивчення впливу встановлення значної кількості КГУ та реалізації проєктів уловлювання метану в Україні необхідно використовувати різні економіко-математичні моделі як для усієї енрегетичної системи, наприклад модель TIMES-Україна [10], що широко використовується при підготовці стратегічних документів у сфері енергетики та клімату, так і секторальні моделі, наприклад модельний інструмент Plexos, яикй використовує оператор системи передачі ПрАТ «Національна енергетична компанія „Укренерго“» при підготовці щорічних звітів з оцінки відповідності (достатності) генерувальних потужностей [11].

Водночас представлені розрахунки достатньо обґрунтовано показують, що переобладнання існуючих біогазових установок в ЄС на заводи з виробництва біометану, а також передача демонтованих при цьому КГУ для проєктів посилення резильєнтності енрегосистеми України та утилізації викидів метану є взаємовигідним та економічно доцільним рішенням для обох сторін. Це також сприятиме скороченню викидів ПГ, зміцненню енергетичної безпеки ЄС та України, підвищенюю рівня декарбонізації та резильєнтності економік Європейського континенту. Відповідні заходи безпосередньо сприятмуть реалізації пріоритетів сучасної державної енергетичної та кліматичної політики

України, а також опосередковано впливатимуть позитивно й на інші сфери економіки та аспекти розвитку суспільства.

ПОСИЛАННЯ

1. Статистичний звіт за 2024 рік. Європейська біогазова асоціація. Отримано 14 березня 2025 р. з https://www.europeanbiogas.eu/eba-statistical-report-2024/
2. European Commission. (n.d.). Biomethane. European Commission - Energy. Retrieved March 14, 2025, from https://energy.ec.europa.eu/topics/renewable-energy/bioenergy/biomethane_en
3. Біоенергетика МЕА. (2024). Звіт по країнах 2024: ЄС-27. Отримано 14 березня 2025 р. з https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/01/CountryReport2024_EU27_final_v2.pdf
4. Клименко, В. М., & Супрун, Т. Т. (2022). Технології метанації для отримання синтетичного відновлюваного метану. Теплофізика та теплоенергетика, 44(3), 63–72.
5. Трипольська, Г. С., Дячук, О. А., Подолець, Р. З., & Чепелєв, М. Г. (2018). Біогазові проєкти в Україні: перспективи, наслідки та регуляторна політика. Економіка і прогнозування, (2), 111–134.
6. Гелетуха, Г. Г., Кучерук, П. П., & Матвєєв, Ю. Б. (2022). Перспективи виробництва біометану в Україні. Аналітична записка UABIO, 29.
7. Honcharuk, I. V., & Vovk, V. Y. (2022). Виробництво біометану з агробіомаси в Україні: проблеми та перспективи. Podilian Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics, (37), 65–72.
8. Мазур, К. В., & Гонтарук, Я. В. (2022). Перспективи виробництва біогазу з відходів підприємств та домогосподарств на полігонах твердих побутових відходів. Східна Європа: економіка, бізнес та управління. 2022. № 2(35). С. 63–71.
9. Ukraine. (2024, December 30). National Inventory Document (NID) 2024. United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/documents/645143
10. Подолець Р. З., Дячук О. А. Стратегічне планування у паливно-енергетичному комплексі на базі моделі "TIMES-Україна": наук. доп. НАН України; Ін-т екон. та прогнозув. К., 2011. 150 с.
11. ПрАТ «Національна енергетична компанія „Укренерго“». Звіт з оцінки відповідності (достатності) генеруючих потужностей. Отримано 14 березня 2025 р. з https://ua.energy/zvit-z-otsinky-vidpovidnosti-dostatnosti-generuyuchyh-potuzhnostej/

УДК 621.311.25

КОМБІНОВАНИЙ ГЕНЕРАТОР ТЕПЛОВОЇ ТА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Ю. М. Лобунець[1], В. П. Клюс[2], Г. О. Четверик[3]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна,
тел.: (+380) 67- 466-90-79, e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Розроблено комбінований генератор теплової та електричної енергії для автономних споживачів на базі піролізного пальника, що використовує біомасу, і термоелектричного генератора з термосифонними системами нагріву та охолодження.

Ключові слова: *піролізний пальник, біомаса, термоелектричний генератор, автономна установка*

COMBINED HEAT AND POWER GENERATOR

Y. Lobunets[1], V. Klyus[2], H. Chetveryk[3]

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrologichna St., Kyiv, Ukraine,
tel.: (+380) 67- 466-90-79, e-mail: yurilobunets@yahoo.co.uk

Developed a combined heat and electricity generator for autonomous consumers based on a pyrolysis burner using biomass and a thermoelectric generator with thermosiphon heating and cooling systems.

Keywords: *pyrolysis burner, biomass, thermoelectric generator, autonomous installation*

ORCID: [1]0000-0002-3593-1687; [2]0000-0001-8536-3211; [3]0000-0001-9398-1968

Дослідний зразок генератора теплової та електричної енергії

Розроблено комбінований генератор теплової та електричної енергії, який містить піролізний пальник, що працює на будь-якій біомасі, і термоелектричний генератор з високоефективними системами нагріву та охолодження.

Проведено теоретичний аналіз розробленої схеми й оптимізацію її параметрів. Розроблено математичну модель і програми розрахунків комбінованого генератора, створено його проєкт, виготовлено дослідні зразки піролізного пальника, двофазних теплообмінних систем нагріву й охолодження та термоелектричного генератора для комбінованого генератора теплової та електричної енергії. Проведені експериментальні дослідження дослідного зразка, визначені його енергетичні характеристики. Визначено питомі характеристики дослідженої схеми КГТЕ з двофазними системами нагріву й охолодження термоелектричного генератора енергії. Показано, що розроблений піролізний пальник ПП-8 як джерело теплової енергії відповідає умовам технічного завдання й забезпечує необхідну потужність (від 8 до 20 кВт) та тривалість робочого циклу між заправками (2–5 год залежно від режиму). Опалювальний ККД пальника сягає 80 %. Визначено конфігурацію термоелектричного генератора, необхідну для досягнення проєктних показників електричної потужності (100 Вт).

УДК 662.636+662.613.1

АДАПТОВАНА МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУР ПЛАВКОСТІ ЗОЛИ ТВЕРДИХ БІОПАЛИВ

М. М. Жовмір

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: +38044 2062809, e-mail: mykola.zhovmir@gmail.com

Несприятливою особливістю пелет, виготовлених із соломи чи сільськогосподарських відходів, є значні зміни вмісту золи та можливий широкий діапазон температур її плавкості, що утруднює їх використання в котельних установках. Визначення температурних характеристик плавкості золи за стандартною методикою є дорогим для дрібних виробників пелет. Для солом'яних пелет, що призначаються для невеликих опалювальних котлів зі спалюванням у нерухомому шарі, запропоновано визначати температури плавкості золи за спрощеною методикою в окислювальному середовищі, адаптованою до наявного обладнання.

Ключові слова: *тверде біопаливо, солома, солом'яні пелети, зола, температури плавкості, визначання.*

ADAPTED METHOD FOR DETERMINING THE FUSIBILITY TEMPERATURES OF SOLID BIOFUELS ASH

M. Zhovmir

Institute of Renewable Energy of National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: +38044 2062809, e-mail: mykola.zhovmir@gmail.com

Unfavorable features of pellets, produced from straw or agricultural wastes, are significant changes in ash content and a wide range of possible fusibility temperatures of ash, which complicate their use in boilers. Determining fusibility temperatures of straw pellets ash according to a standard method is expensive for small pellet producers. For straw pellets, intended for small heating boilers with combustion in a fixed bed, it is proposed to determine fusibility temperatures of ash in an oxidizing environment according to a simplified method, adopted to available equipment.

Key words: *solid biofuel, straw, straw pellets, ash, fusibility temperatures, determination.*

ORCID: 0000-0001-6514-7474

У виробництві енергії для промислових та побутових потреб широко застосовують пелети з біомаси, їх світове виробництво у 2023 році становило 44,2 млн т. У країнах ЄС максимальне споживання пелет, переважно деревних, у 2021 році становило 34,6 млн т. У 2023 році через обмеження поставок споживання пелет країнами ЄС скоротилося до 22 млн т. У побутовому секторі було спожито майже 36 %, а в комерційному секторі – 23 % усіх деревних пелет. У побутовому та комерційному секторах фактичне споживання пелет багато в чому визначається особливостями окремих опалювальних сезонів. За оцінками експертів, річне споживання деревних пелет у житловому секторі з установками до 50 кВт становить 14 млн т, а в комерційному секторі з установками від 50 кВт до 1 МВт – 3,7 млн т. Значному використанню деревних пелет сприяла їх сертифікація за стандартом ENplus, при цьому щорічне світове виробництво сертифікованих пелет досягло 13,5 млн т [1].

Сертифікаціє забезпечує технічну сумісність властивостей палива та характеристик котельних установок для їх використання, що своєю чергою є запорукою належної експлуатації обладнання з паспортною енергетичною ефективністю з мінімальними витратами праці, дотриманням встановлених екологічних вимог. В підсумку належна якість палива дозволяє досягти прогнозованої економічної ефективності переходу від використання викопних палив на відновлювані тверді біопалива.

У торгівельній мережі України наявні пелети виготовлені з деревини, соломи, відходів переробної промисловості, але при цьому дані про об'єктивні властивості палив покупцю не надаються. Під час купівлі деревних пелет покупець може орієнтуватися за їх кольором – світлий колір може свідчити про їх виготовлення зі стовбурової деревини без кори і про їх імовірно прийнятну якість. Купівля пелет, що виготовлені з цілих дерев з корою, лісосічних відходів,

відходів переробки деревини чи сільськогосподарської біомаси, при відсутності інформації про показники їх якості, може нести ризики при їх використанні. Намагання спалювати пелети невідповідної якості може призводити до порушень у роботі обладнання або й до неможливості спалювання такого палива.

Стосовно пелет, виготовлених із соломи, найпроблематичнішим є надання інформації про температурні характеристики плавкості їх золи, що зумовлене мінливістю властивостей соломи, з якої виготовляються пелети. Температура початку деформації солом'яної золи може коливатися в межах від 775 до 1225 °C, з найімовірнішим значенням 925 °C [2]. Як наслідок, спалювання солом'яних пелет може ускладнюватись у котлах, призначених для спалювання деревних пелет, які повинні мати температуру деформації золи не менше 1100 чи 1200 °C [3]. Спеціалізовані лабораторії надають послуги з визначання температурних характеристик плавкості золи біопалив з використанням тестового обладнання, передбаченого стандартом [4]. Витрати на виконання одного такого аналізу можуть перевищувати вартість добового виробництва пелет у невеликому фермерському господарстві. Через мінливість властивостей неможливо накопичувати великі партії солом'яних пелет з однорідними показниками та застосовувати дорогі методи їх дослідження. Необхідно визначати властивості дрібних партій пелет, а це потребує зниження витрат на виконання лабораторних аналізів.

Зважаючи на найімовірніше використання солом'яних пелет у невеликих опалювальних котлах зі спалюванням у нерухомому шарі, визначення плавкості золи солом'яних пелет можна здійснювати за скороченою програмою. В Інституті відновлюваної енергетики розроблена спрощена методика визначення температурних характеристик плавкості золи шляхом адаптації методики американського стандарту [5] до використання наявного обладнання та приладів. Зразки золи готують із аналітичних проб солом'яних пелет, шляхом озолення в муфельній печі, одночасно з визначенням вмісту золи. З золи, розтертої у ступці до дрібних часток, виготовляють тестові пірамідки. Тестові пірамідки досліджують, нагріваючи їх у муфельній печі з повітряним середовищем зі швидкістю 8–11 °C/хв до максимальної температури 1275 °C, при цьому візуально спостерігають за фазами їх плавлення.

У створеній дослідній установці можна визначати в окислювальних умовах такі температури плавкості золи: температуру початку збігання (SST), температуру початку деформації (IDT), температуру розм'якшення (ST). За температуру початку збігання (SST) приймається температура муфельної печі, при якій площа зображення зольної пірамідки становить 95 % початкової площі її зображення [4]; за температуру початку деформації (IDT) приймається температура муфельної печі, при якій з'являються перші ознаки округлення вершинки зольної пірамідки; за температуру розм'якшення (ST) приймається температура муфельної печі, при якій пірамідка змінилася до частки зі сферичною вершиною, в якій висота дорівнює ширині біля основи [5]. При проведенні досліджень можна робити фото тестової пірамідки золи, що відображають її форму та поточне значення температури в муфельній печі.

На наявному обладнанні за спрощеною методикою неможливо визначати температуру напівсфери HT та температуру розтікання FT, які для золи солом'яних пелет можуть становити 1050–1270 °C та 1080–1500 °C, відповідно. Дані про значення HT та FT необхідні при організації спалювання солом'яних пелет у великих котельних установках з видаленням шлаку в рідкому стані. У разі формування великих партій солом'яних пелет для використання на великих електричних станціях з видаленням рідкого шлаку визначення властивостей золи може здійснюватися за повними методиками [4] або [5]. Також на наявному обладнанні неможливо досліджувати плавкість золи у відновлювальному середовищі, що може бути необхідним щодо пелет, призначених для газифікаційних установок.

ПОСИЛАННЯ

1. Pellets. Bioenergy Europe Statistical Report 2024. Bioenergy Europe. Brussels. 2025. 91 p. http://www.bioenergyeurope.org (дата звернення: 5.03.2025).
2. Hartmann, H., Böhm, T., Maier, L. (2000). Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Technischer Bericht, Bayrisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (StMLU). 2000. 148 s.
3. ENplus. Quality Certification Scheme for Wood Pellets. ENplus Handbook. Part 3: Pellet Quality Requirements. Version 3.0; European Pellet Council. European Biomass Association: Brussels, 2015, 10 p. https://nencom.com/f/products/pellets/enplus/enplus-3-v3-inter-en.pdf
4. ISO 21404:2020 Solid biofuels. Determination of ash melting behaviour. ISO, Geneva. 2020. 13 p.
5. ASTM D1857-03. (2003). Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2003. 4 p.

УДК 621.352.6

ДОСЛІДЖЕННЯ КАРБОНІЗАЦІЇ ТА СПАЛЮВАННЯ ТВЕРДОЇ БІОМАСИ

О. М. Дудник[1], І. С. Соколовська[1, 2]

[1]Інститут теплоенергетичних технологій НАН України,
вул. Андріївська, 19, м. Київ, 04070, Україна,
тел.: (044) 425-04-19, e-mail: aldudnyk2018@gmail.com
[2]Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

Досліджено процеси карбонізації та спалювання твердої біомаси на створених експериментвльних установках. Для досліджень використано методику термогравіометрічного аналізу.

Ключові слова: *тверда біомаса, карбонізація, спалювання.*

RESEARCH OF CARBONAZATION AND COMBUSTION OF SOLID BIOMASS

O. Dudnyk[1], I. Sokolovska[1, 2]

[1]Thermal Energy Technology Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
19 Andriivska Str., Kyiv, Ukraine, 04070
phone: (044) 425-04-19, e-mail: aldudnyk2018@gmail.com
[2]General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150

The processes of carbonization and combustion of solid biomass were researched at the created experimental installations. The thermogravimetric analysis method was used in this research.

Key words: *solid biomass, carbonization, combustion.*

ORCID: [1]0000-0002-9832-1536; [2]0000-0003-1959-9837

У світі збільшилась кількість енергетичних установок, конструкція яких забезпечує виконання принципу роботи WTE (Waste-to-Energy) – використання відходів для вироблення тепла, електричної енергії та інших продуктів [1]. Використання процесів конверсії твердих відходів біомаси та пластику (карбонізація, піроліз, газифікація, парціальне окиснення та спалювання) відіграє значну роль, особливо під час децентралізованого перетворення енергії відходів на продукти з доданою вартістю [2].

Схему установки для досліджень карбонізації твердої біомаси, створеної в ІТЕТ НАН України, температуру в електричній печі та вагу зразка в модулі карбонізації під час карбонізації зразків берези показано на рис. 1.

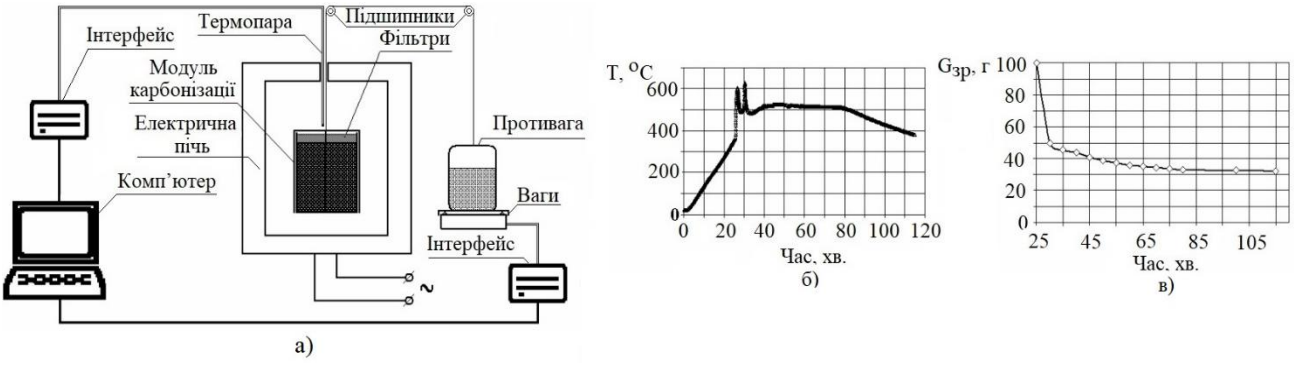


Рис. 1. Установка для карбонізації відходів деревини (а), температура в електричній печі (б) та вага зразка в модулі карбонізації (в) під час карбонізації зразків берези

В установці використовується принцип противаги з підшипниками. Визначено динаміку карбонізації відходів деревини. Модуль карбонізації підвішується в середині електричної печі з використанням жаростійкої проволоки. Температура в печі вимірюється термопарою. Змінення маси відходів деревини вимірюється вагами. Дані щодо температури та маси зразка передаються в комп'ютер через інтерфейси.

Для досліджень використано попередньо подрібнені, просочені в 0,5%-му водному розчині H_3PO_4 та висушені зразки відходів берези. Внаслідок проведених раніше досліджень встановлено, що завдяки попередньому просоченню зразків твердої біомаси в 0,5%-му водному розчині H_3PO_4 можна одержати більшу кількість деревного вугілля [3]. Вміст летких, золи, вологи та фіксованого вуглецю в зразках становив, мас. %: 70,1, 0,4, 10,4 та 19,1 відповідно. Вміст летких, золи, вологи та фіксованого вуглецю в одержаному деревному вугіллі (ДВ) становив, мас. %: 14,2, 1,2, 1,3 та 83,3 відповідно. Насипна щільність ДВ становила 181,6 кг/м^3. Нижча теплота згоряння ДВ 30,73 МДж/кг. Отримане ДВ використано для одержання збагаченого воднем синтез-газу та активованого вугілля на установці для дослідженнь паливних елементів. Установку описано в роботі [4].

Установку для досліджень спалювання твердої біомаси та показники процесу горіння шкаралупи волоського горіху (ШВГ) показано на рис. 2. Компактна установка призначена для досліджень кінетики процесів конверсії твердих органічних відходів (ТОВ), а також може використовуватися для швидкого приготування їжі в польових умовах.

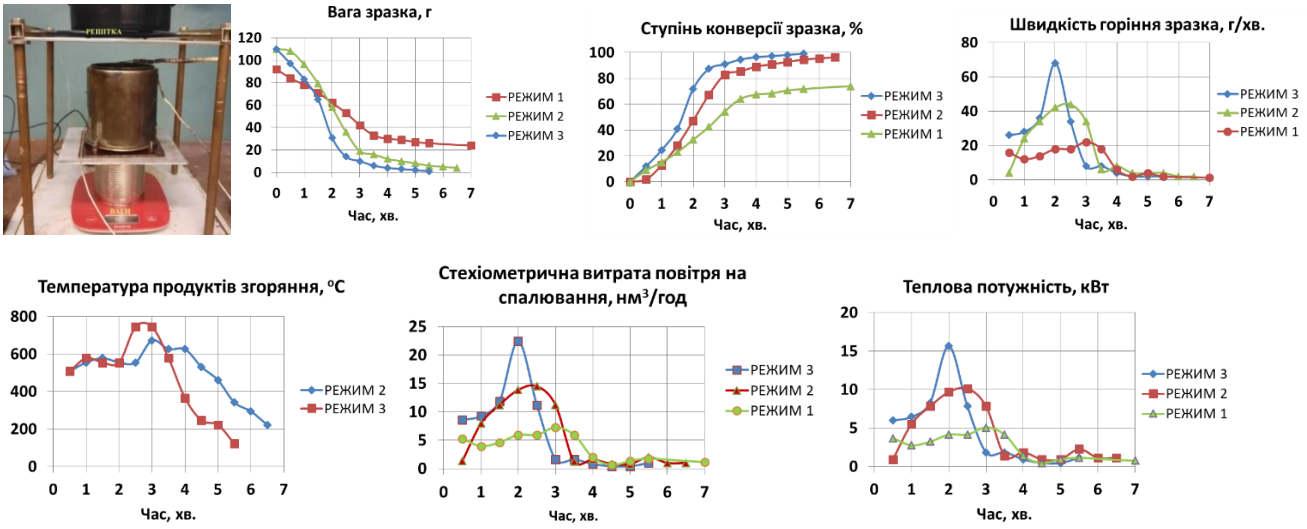


Рис. 2. Установка для досліджень спалювання твердої біомаси та показники процесу горіння шкаралупи волоського горіху

Установка складається з решітки, камери згоряння, охолоджувача, вентілятора та вагів. Над камерою згоряння розташована решітка, камера згоряння встановлена на охолоджувач, охолоджувач – на ваги. Термопари розташовані: над камерою згоряння (в потоці продуктів згоряння), на стінках зовнішнього та внутрішнього корпусів камери згоряння.

За результатами технічного аналізу вміст вологи, золи, летких та фіксованого вуглецю в ШВГ становив, мас. %: 9,4, 0,3, 70,1, 20,2 відповідно. Вміст вуглецю, водню, кисню, азоту, вологи та золи в ШВГ становив, мас. %: 45,1, 5,3, 38,8, 1,1, 9,4, 0,3 відповідно.

Компактну автономну установку спалювання ТОВ використано для швидкого приготування їжі за середньої теплової потужності установки від 7 до 8,8 кВт з використанням повітряного турбовентилятора, що живиться від батареї, мобільного телефона чи power bank.

ПОСИЛАННЯ

1. Levaggi L., Levaggi R., Marchiori C., Trecroci C. Waste-to-Energy in the EU: The Effects of Plant Ownership, Waste Mobility, and Decentralization on Environmental Outcomes and Welfare. Sustainability. 2020. 12(14). 5743; DOI: 10.3390/su12145743

2. Zhovtyansky V. A., Dudnyk O. M., Ostapchuk M. V., Sokolovska I. S. Conversion of Carbon-Containing Raw Material Using Plasma Technologies. Energy Technologies and Resource Saving]. 2023. No. 4. Pp. 90–112. https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.08

3. Дудник А. Н., Стрижак П. Е., Соколовская И. С., Трипольский А. И., Калишин Е. Ю., Донец В. В. Изучение процесса карбонизации шелухі подсолнечника. Modern Science: Researches, Ideas, Results, Technologies. 2011, 3(8), 74–78 URL: https://chiffa.org/msjrn.old/ru/issues/2011/files/papers/3/74-78.pdf

4. Dudnyk O. M., Sokolovska I. S. Conversion of Ukrainian low grade solid fuels with CO2 capture. Proc. 27th Annual International Pittsburgh Coal Conference 2010 (PCC 2010) (Oct. 11–14, 2010, Istanbul, Turkey). Vol. 2. P. 1012–1033. URL: https://www.researchgate.net/publication/341671478_CONVERSION_OF_UKRAINIAN_LOW_GRADE_SOLID_FUELS_WITH_CO2_CAPTURE

УДК 621.311.25

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ВУЗЛА ПОДАЧІ ПОВІТРЯ КАМЕРИ ГАЗИФІКАЦІЇ НА РУХ ПОТОКІВ ПОВІТРЯ В ГАЗОГЕНЕРАТОРІ

Г. А. Голуб[1], В. П. Клюс[2], І. С. Омаров[3]

[1]Національний університет біоресурсів і природокористування України
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна,
тел.: (095) 311-50-50, e-mail: gagolub@ukr.net
[2, 3]Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net

Розглянуто питання про розподіл потоків повітря в камері газифікації газогенератора. Запропонована методика розрахунку конструкційно-технологічних параметрів вузла подачі повітря камери газифікації із застосуванням програми ANSYS Fluent, що дозволяє забезпечити рівномірний розподіл повітряних мас у газогенераторі з метою підвищення енергоефективності процесу.

Ключові слова: *камера газифікації, газогенератор, газо-дуттьовий вузол, генераторний газ.*

INFLUENCE OF AIR-SUPPLY UNIT PARAMETERS OF THE GASIFYING CHAMBER ON THE DISTRIBUTION OF AIR FLOWS IN A GAS PRODUCER

G. Golub[1], V. Klyus[2], I. Omarov[3]

[1] National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
Heroyiv Oborony st., 15, Kyiv, Ukraine, 03041
phone: (095) 311-50-50, e-mail: gagolub@ukr.net
[2, 3] Institute of Renewable Energy of National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (044) 206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net

The current issue regarding the distribution of an air flow in the gasification chamber of the gas producer has been addressed. A methodology for calculating the structural and technological parameters of the air-supply unit of the gasification chamber has been proposed, using the ANSYS Fluent software. This approach ensures an even distribution of air masses within the gas producer to enhance the energy efficiency of the process.

Key words: *gasification chamber, gas producer, gas-supply unit, generator gas.*

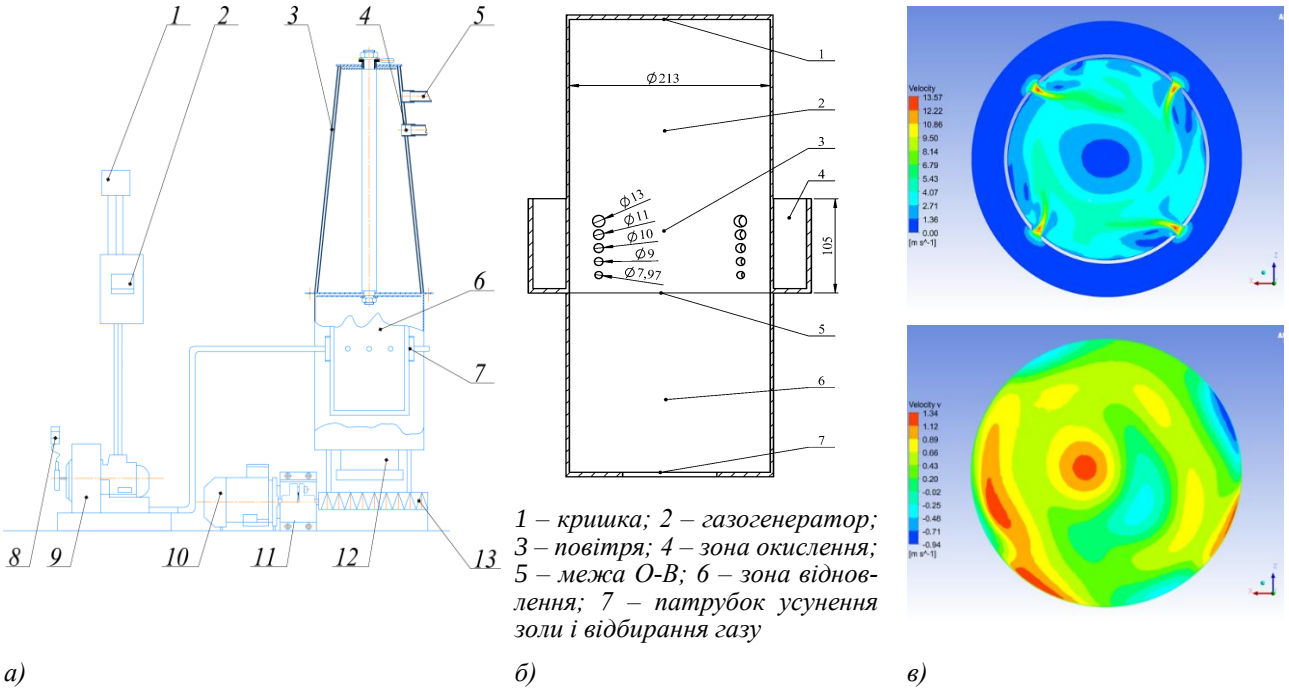
ORCID: [1]0000-0002-2388-0405; [2]0000-0001-8536-3211; [3]0000-0001-9449-853X.

Постановка задачі. До конструкцій сучасних камер газифікації газогенераторів на біомасі висуваються досить жорсткі техніко-експлуатаційні вимоги. Оскільки основним та найбільш конструкційно складним вузлом камери газифікації є вузол подачі повітря, дослідження його параметрів та їхнього впливу на рівномірність розподілу повітря в камері газифікації є актуальним завданням. Аналіз сучасних наукових робіт [1, 2], присвячених дослідженню параметрів різних конструкцій газогенераторів, зокрема і камери газифікації, свідчить що використання методів імітаційного моделювання дозволяє суттєво скоротити витрати коштів, часу та зусиль на конструкторські розробки, забезпечуючи при цьому високу точність отриманих результатів. Згідно з роботою [3] моделювання в програмному середовищі ANSYS Fluent (США) дозволяє відтворити складні фізичні, хімічні та термодинамічні процеси в науковій практиці. Проте в наявній літературі основна увага приділяється моделюванню температури в активній зоні камери газифікації та визначенню складу виробленого горючого газу залежно від виду біомаси та конструкції газогенератора. Однак у наявних наукових роботах умови рівномірного розподілу потоків повітря в газогенераторі для уникнення зон, де процеси газифікації через відсутність окисника протікати не будуть, не досліджувалися. Отже, попри складність урахування всіх параметрів газодинамічних і тепло- й масообмінних явищ, які мають місце в процесі газифікації біомаси, проведення таких досліджень є необхідним та своєчасним. Для забезпечення рівномірного розподілу повітряних мас у газогенераторі розроблено лабораторну газогенераторну установку (рис. 1).

Матеріали та методи дослідження. Гіпотеза дослідження – існує конструкція газо-дуттьового вузла камери газифікації, яка при заданих швидкості і об'ємній витраті повітря забезпечить рівномірне перекриття потоками повітря поперечного перерізу камери газифікації на межі протікання окислювально-відновлювальних реакцій (межа О-В).

Для моделювання вибрано програмне середовище ANSYS Fluent. Площа поперечного перерізу газогенератора становила 0,037 м^2, швидкість потоку повітря – 0,019 кг/с, об'ємна витрата повітря – 0,016 м^3/с. У поперечному перерізі

камери рівномірність подачі повітря на межі О-В визначалася за відношенням стандартного відхилення до середнього значення швидкості (коефіцієнт варіації). Моделювання руху потоків повітря в газогенераторі виконано для семи варіантів конструктивного виконання вузла подачі повітря камери газифікації газогенератора.



1 – кришка; 2 – газогенератор; 3 – повітря; 4 – зона окислення; 5 – межа О-В; 6 – зона відновлення; 7 – патрубок усунення золи і відбирання газу

а) *б)* *в)*

Рис. 1. Схема лабораторної газогенераторної установки з розробленим вузлом подачі повітря: а) газогенераторна установка, б) вузол подачі повітря; в) розподіл потоків повітря в газогенераторі: 1 – джерело струму 0,4 кВ; 2 – частотний перетворювач; 3 – камера піролізу; 4 – патрубок для піролізного газу; 5 – патрубок горючого газу; 6 – газогенератор; 7 – вузол подачі повітря; 8 – анемометр; 9 – повітродувка; 10 – електродвигун; 11 – муфта; 12 – зольник; 13 – транспортер

Результати дослідження. Найкраще забезпечує заповнення об'єму газогенератора повітрям та рівномірне перекриття потоками повітря перерізу камери на межі О-В конструкція вузла (рис. 1, б), де коефіцієнт варіації становив 93 %. При цій конструкції вузла в газогенераторі присутні лише незначні за площею (до 0,0043 м^2) зони з відсутністю руху повітряних мас, на відміну від інших шести варіантів конструкцій вузла подачі повітря. Швидкість повітряних мас є вирівняною в усьому поперечному перерізі й становить V≈4,5 м/с. Усереднене значення вертикальної складової швидкості повітряних мас у перерізі на вході в зону відновлення камери становить V≈0,6 м/с. Оснащення вузла подачі повітря фурмами суттєво не впливає на якісні показники розподілу потоків повітря в газогенераторі. Змінюється лише характер їх розподілу.

Висновки. Виконано моделювання руху потоків повітря в газогенераторі залежно від конструкції вузла подачі повітря. Встановлено, що конструкція вузла подачі повітря № 6 забезпечує найбільш рівномірний рух струменів повітря в робочому об'ємі газогенератора при цьому досягається найвища рівномірність перекриття струменями повітря поперечного перерізу камери газифікації. На практиці такий характер розподілу повітряних мас забезпечить найвищу ефективність виробництва газу з біомаси, високий вміст в газі CO та H_2 і високу його теплотворну здатність.

Наукові розробки, представлені в цій роботі, виконувалися під час реалізації міжнародного проєкту HEI-COPILOT в межах EIT HEI Initiative "Innovation Capacity Building for Higher Education", яка фінансується Європейським Союзом.

ПОСИЛАННЯ

1. Tregub, M., Holubenko, A., Tsyvenkova, N. (2021). Experimental Studies of Structural and Technological Parameters of a Downdraft Gasifier Based on Plant Biomass. Scientific Horizons, 24 (6), 9–23.
2. Голуб, Г. А., Цивенкова, Н. М., Голуб, В. А., Чуба, В. В., Омаров, І. С., & Голубенко, А. А. (2022). Виявлення впливу конструкційно-технологічних параметрів газо-дуттьового вузла на розподіл потоків повітря в газогенераторі. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 4(8 (118), 29–43.
3. Tsyvenkova, N., Kukharets, S., Kukharets, V., & Savchenko, N. (2020). Experimental study of influence of tuyere belt design on thermal conditions of gasification chamber operation. Engineering for Rural Development, 19, 1248–1254.

УДК 621.314

ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЧНА ПЕРЕРОБКА ЛУШПИННЯ СОНЯШНИКУ

В. П. Клюс[1], З. В. Маслюкова[2], Є. Г. Новицька[3]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net

Розглянуто актуальне питання щодо термічної переробки лушпиння соняшнику в торрефікат, біочар та горючий газ. Запропонована технологія переробки поєднує піроліз та торрефікацію лушпиння в одній установці, що дозволяє підвищити енергоефективність процесу.

Ключові слова: *лушпиння соняшнику, піроліз, торрефікація, горючий газ.*

ENERGY-TECHNOLOGY PROCESSING OF SUNFLOWER HUSKSP

V. Klius[1], Z. Masliukova[2], Y. Novytska[3]

Institute of Renewable Energy Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
50 Metrolohichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (044) 206-28-09, e-mail: biomassa@ukr.net

The current issue of thermal processing of sunflower husks into torrefaction, biochar and combustible gas is considered. The proposed processing technology combines pyrolysis and torrefaction of husks in one installation, which allows to increase the energy efficiency of the process.

Key words: *sunflower husks, pyrolysis, torrefaction, combustible gas.*

ORCID: [1]0000-0001-8536-3211; [2]0000-0002-4180-7930; [3]0000-0001-9217-4099

Постановка задачі. В Україні успішно вирішено питання поводження з відходами олійних комбінатів, а саме лушпинням соняшнику. Близько 90 % лушпиння перероблюються на пелети й використовуються в теплоенергетиці. Через високу гігроскопічність пелет їх необхідно зберігати у закритих приміщеннях, що потребує наявності великих ангарів. Крім того, спостерігається насичення ринку пелетами, внаслідок чого ціна на них зменшується, що впливає на рентабельність виробництва. Станом на березень 2025 р. вартість пелет становить від 4000 до 7500 грн за тонну. Для підвищення енергоємності пелет може бути проведена їх торрефікація. При цьому торрефіковані пелети стають гідрофобними. Інший напрям переробки лушпиння соняшнику полягає в його піролізі для виробництва біочару, який використовується в сільському господарстві.

Прогнозована вартість торрефікованого лушпиння й біочару з лушпиння буде більшою за вартість звичайного деревного вугілля, яка станом на березень 2025 р. стартує від 28 000 грн/т. На виготовлення однієї тонни торрефікованого палива та піролізу лушпиння втрачається 1,8…2,2 лушпиння соняшнику. Отже, економічна вигода суттєва, тому що технологія автотермічна (потребує лише незначну кількість електроенергії для приводу машин).

Торрефікація відбувається зазвичай при температурі 180…300 °С, а оптимальною температурою для піролізу є 500…600 °С [1]. Ці два процеси відбуваються в окремих установках. З метою зменшення втрат енергії нами запропонована технологічна схема, в якій піроліз і торрефікації лушпиння відбуваються в одній установці.

Матеріали дослідження. Для підвищення продуктивності переробки в установці (рисунок) використано піролізний реактор безперервної дії. Цей реактор має відкритий верх і працює під розрідженням [2].

Реактор торрефікації шнекового типу із зовнішнім нагріванням лушпиння. Установка працює в такий спосіб. У реактор окиснювального піролізу завантажується біочар, верхній шар якого розпалюється. Включається в роботу димосос, який через відкритий верх реактора піролізу втягує повітря в зону горіння біочару, завдяки чому температура горіння підвищується до 600 °С. Потім включається шлюзовий затвор, і частина біочару вивантажується у збірник, а на його місце поступає лушпиння. Відбувається процес окиснювального піролізу. Далі синхронізується вивантаження біовугілля і подача лушпиння в піролізний реактор. Піролізний газ з реактора через димосос поступає в камеру згоряння і спалюється з повітрям. Димові гази з камери згоряння поступають в сорочку шнекового торрефі-

катора і нагрівають лушпиння до необхідної температури (max 320 °С). Інший потік лушпиння через систему транспортерів і шлюзовий затвор (на рисунку не показані) поступає в торрефікатор. Лушпиння в торрефікаторі нагрівається, торрефікується і переміщується шнеком до люку вивантаження. В торрефікаторі утворюється горючий газ (торр. газ), який не містить азоту. Цей газ може бути використаний як котельне паливо. Охолоджений димовий газ із сорочки торрефікатора виводиться в атмосферу. Таким чином в установці виробляються одночасно енергоносії (торрефіковане лушпиння і торр. газ), а також технологічний продукт сільськогосподарського призначення – біочар із лушпиння.

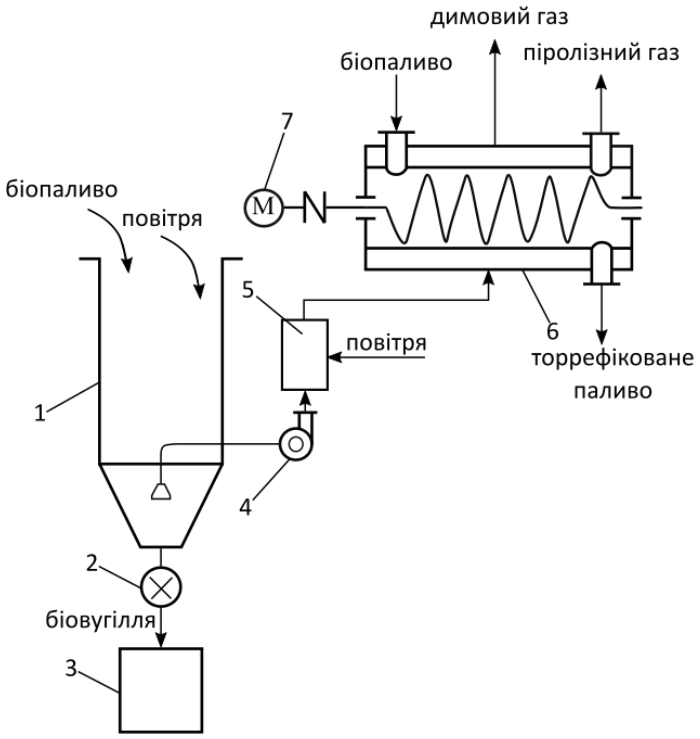


Рисунок. Схема установки безперервної дії:
1 – реактор окиснювального піролізу, 2 – шлюзовий затвор, 3 – збірник біовугілля, 4 – димосос, 5 – камера згоряання, 6 – шнековий торрефікатор, 7 – мотор-редуктор

Висновки. Розроблена енергоефективна технологічна схема, в якій поєднується сумісна робота реактора окиснювального піролізу і шнекового торрефікатора. Енергоефективність технології досягається завдяки корисному використанню піролізного газу для нагрівання торрефікатора.

ПОСИЛАННЯ

1. Клюс В. П., Четверик Г. О., Матвійчик О., Маслюкова З. В. Торрефікація чи піроліз біомаси. Перспективи для України. Відновлювана енергетика. 2025. № 2. С. 168–175.
2. Патент України на корисну модель № 143271. Реактор піролізний / В. П. Клюс, С. В. Клюс. Бюл. № 14 від 27.07.2020.

УДК 662.73:628.336.3:628.4.04-405

ДОСЛІДЖЕННЯ СУШІННЯ КОМПОЗИТНОЇ СИРОВИНИ З МУЛОВИХ ВІДКЛАДЕНЬ, ТОРФУ ТА ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ З БІОМАСОЮ

Ж. О. Петрова[1], В. М. Пазюк[2], Ю. П. Новікова[3], А. В. Бадеха[4]

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 139-71-21, e-mail: yuliianovikova3@gmail.com

У роботі представлені результати дослідження кінетики сушіння композитної сировини з мулових відкладень, твердих побутових відходів, торфу та біомаси.

Ключові слова: *сушіння, мулові відкладеня, тверді побутові відходи, торф, рештки посівів кукурудзи.*

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF DRYING MODES OF COMPOSITE RAW MATERIALS BASED ON OF SOLID PEAT RESIDUES

Zh. Petrova[1], V. Paziuk[2], Yu. Novikova [3], A. Badekha [4]

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 139-71-21, e-mail: yuliianovikova3@gmail.com

The paper presents the results of a study of the drying kinetics of composite raw materials based on solid peat residues and corn residues under different conditions.

Key words: *drying, peat, solid peat residues, corn residues.*

ORCID: [1]0000-0001-7385-8495, [2]0000-0002-4955-1941, [3]0000-0002-6705-1000; [4]0009-0003-3903-3766

Однією з найактуальніших проблем у сучасному світі є пошук і постачання відновлюваних джерел енергії, здатних конкурувати з нафтою і природним газом. В Україні сьогодні ще існує проблема з утилізацією осадів очисних сполук і твердих побутових відходів, які насамперед є екологічною проблемою для наших земель. Створення композитного палива на основі твердих побутових відходів, мулових відкладень, з додаванням торфу та біомаси дозволить покращити еколгічну ситуацію й отримати додаткову енергію. Тому метою роботи є дослідження впливу температури теплоносія на тривалість сушіння композитної сировини для подальшої розробки палива.

Дослідження кінетики сушіння проводили на експериментальному конвективному стенді з автоматичним збором інформації, який розроблено в Інституті технічної теплофізики НАН України. Проведено серію дослідів із впливу температури теплоносія на тривалість сушіння композитної сировини на основі мулових відкладень, твердих побутових відходів, торфу та біомаси [1].

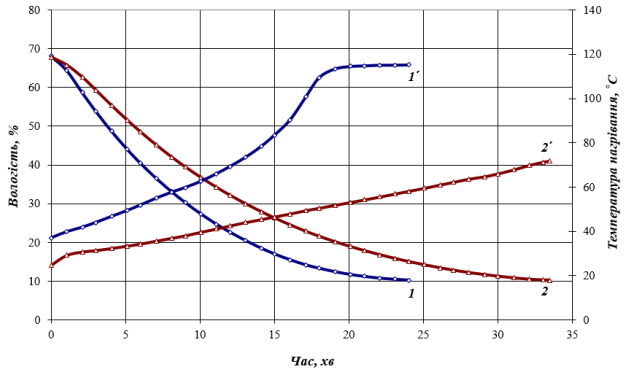


Рис. 1. Зміна вологості (1, 2) і температури всередині гранул (1′, 2′) на основі мулових відкладень і торфу в пропорції 50 % мулу / 50 % торфу від часу. Режимні параметри: V = 2 м/с, d = 6 мм: 1,1′ – 120 ºС; 2,2′ – 80ºС

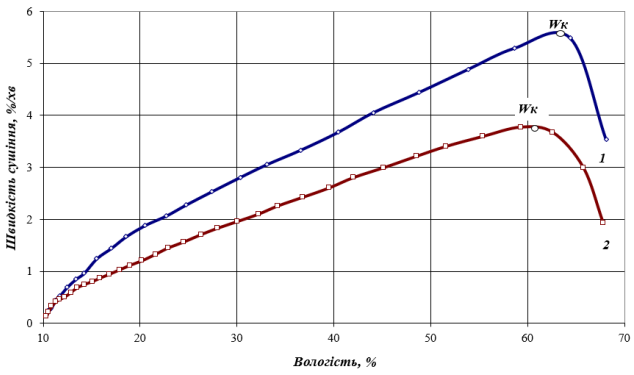


Рис. 2. Зміна швидкості сушіння мулоторфяних гранул у пропорції 50 % мулу / 50 % торфу. Режимні параметри: V = 2 м/с, d = 6 мм: 1 – 120 ºС; 2 – 80 ºС

Дослідження сушіння суміші на основі мулових відкладень і торфу в пропорції 1:1 за температурними режимами 80 та 120 °С. На рис. 1 представлені температурні криві та кінетика сушіння мулоторфяних гранул на конвективному сушильному стенді при температурах 80 та 120 ºС у пропорції 50 % мулу / 50 % торфу. Тривалість сушіння мулоторфяних гранул з підвищенням температури теплоносія від 80 до 120 ºС зменшується на 29,5 % (рис. 1). Нагрівання гранул при температурі теплоносія 80 ºС проходить рівномірно і при вологості гранул 10 % становить 72 ºС, при температурі 120 ºС нагрівання гранул йде інтенсивніше і при відповідній вологості становить 115 ºС.

Швидкість сушіння мулоторфяних гранул з підвищенням температури від 80 до 100 ºС підвищується від 3,8 до 5,5 %/хв (рис. 2).

Дослідження сушіння суміші на основі твердих побутових відходів у співвідношені картон 25 %, текстильні матеріали 15 %, полімерні матеріали 40 %, решткі посівів кукурудзи 20 % за температурними режимами 80, 100 та 120 °С. Зміну кінетики сушіння ТПВБ (80 % ТПВ + 20 % відходів стебла кукурудзи) залежно від впливу температури теплоносія представлено на рис. 3. Як видно на рисунку, з підвищенням температури теплоносія від 80 до 120 °С тривалість сушіння зменшується в 1,84 раза, хоча потрібно зазначити, що інтенсивність сушіння від 80 до 100 °С менша і збільшується в 1,1 раза, при збільшенні в інтервалі температур від 100 до 120 °С інтенсивність підвищується в 1,67 раза. Тобто при порівнянні даних температурних режимів доцільно проводити сушіння ТПВБ при температурі теплоносія 120 °С.

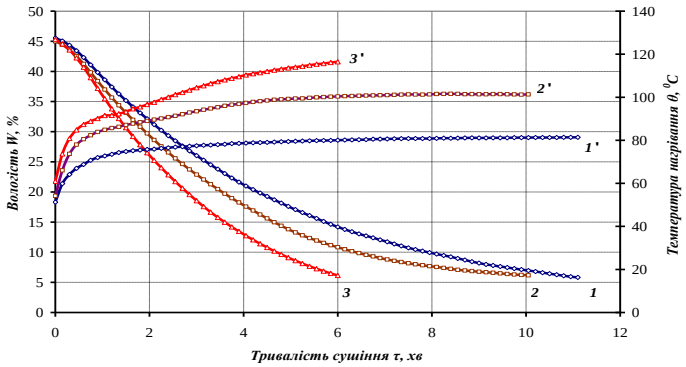


Рис. 3. Зміна вологості (1, 2, 3) і температури всередині шару ТПВБ (1', 2', 3') залежно від часу. Режимні параметри: V = 2,5 м/с, d = 10 г/кг с. п., δ = 7 мм, суміш № 1: 1,1´ – 80 ºС, 2,2´ – 100 ºС, 3,3´ – 120 ºС

На початку процесу відбувається видалення поверхневої вологи з матеріалу і при температурі 120 °С швидкість сушіння набуває свого максимального значення і становить близько 10 %/хв. При зниженні температури швидкість сушіння зменшується і набуває кінцевого значення 2,73 %/хв при вологості матеріалу 6 % (рис. 4).

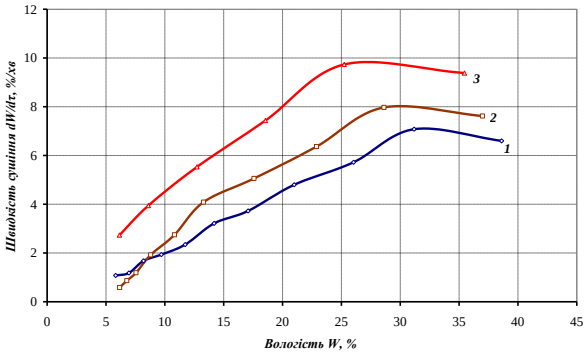


Рис. 4. Зміна швидкості сушіння ТПВБ. Режимні параметри: V = 2,5 м/с, d = 10 г/кг с. п., δ = 7 мм: 1 – 80 ºС, 2 – 100 ºС, 3 – 120 ºС

Досліджена кінетика процесу сушіння композитної сировини на основі мулових відкладень з торфом та твердих побутових відходів з біомасою показує доцільність сворення таких композицій. В подальшому, залежно від регіонів України, доцільно створити нове композитне біопаливо, поєднавши ці компоненти разом та дослідивши їх властивості.

ПОСИЛАННЯ

1. Petrova, Z., Sniezhkin, Y., Paziuk, V., Novikova, Y., & Petrov, A. (2021). Investigation of the Kinetics of the Drying Process of Composite Pellets on a Convective Drying Stand. Journal of Ecological Engineering, 22(6), 159-166. https://doi.org/10.12911/22998993/13767

УДК 621.311.25

ДЕЯКІ АСПЕКТИ СПІЛЬНОГО СПАЛЮВАННЯ БІОМАСИ Й ВУГІЛЛЯ

О. С. Матвійчук[1], Н. І. Соколовська[2]

Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна, тел.: (044) 294-67-29, e-mail: matviychuk 55@ukr.com

Збільшення використання біомаси для енергетичних потреб стає дедалі актуальнішим. В Україні стримується запровадження спільного спалювання біомаси з вугіллям внаслідок недосконалості законодавства щодо використання біомаси за «зеленим» тарифом. У роботі пропонуються основи для розробки методики з нарахування «зеленого» тарифу на частку електроенергії, виробленої з біомаси, під час її спільного спалювання з вугіллям та відповідні пропозиції щодо вдосконалення чинного законодавства.

Ключові слова: *біомаса, вугілля, спільне спалювання, «зелений» тариф, рослинні залишки, пелети.*

SOME ASPECTS OF CO-COMBUSTION OF BIOMASS AND COAL

O. Matviychuk[1], N. Sokolovska[2]

General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, 172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150 phone: (044) 294-67-35, e-mail: e-mail: matviychuk 55@ukr.com

The increase in the use of biomass for energy needs is becoming increasingly relevant. In Ukraine, the introduction of co-combustion of biomass with coal is being held back due to the imperfection of legislation on the use of biomass at a "green" tariff. The paper proposes the basis for developing a methodology for calculating a "green" tariff for the share of electricity generated from biomass when co-combusted with coal and relevant proposals for improving current legislation.

Keywords: *biomass, coal, co-combustion, "green" tariff, plant residues, pellets.*

ORCID: [1]0009-0000-9004-0222 ,[2]30000-0001-9154-4545, [3]0000-0002-2175-0658

Однією з головних переваг енергетичного використання біомаси є її універсальність та мультиваріантність. Біомаса може бути використана у твердому вигляді, шляхом безпосереднього спалювання (дрова, тріска, тюки соломи, гранули й брикети з біомаси), чи перетворена й використана у рідкому (біодизель, біоетанол) чи газоподібному (біогаз, біометан) стані [1].

Одним з напрямів використання біомаси є її спільне спалювання з вугіллям в пиловугільних котлоагрегатах ТЕС. У світі його розглядають як короткостроковий недорогий стійкий варіант використання відновлюваної енергії з низьким рівнем ризику та необхідних інвестицій, який передбачає скорочення викидів CO_2, емісію сірчистого ангідриду та оксидів азоту [2].

В Україні також напрацьований проєкт спільного спалювання біомаси з вугіллям в існуючому пиловугільному котлі ТПП-210А блока 300 МВт [3]. На думку фахівців Інституту теплоенергетичних технологій НАН України, реалізація цього та інших подібних проєктів гальмується нашим законодавсгоспалювання з вугіллям, а отже, залишає їх без можливості повернення інвестицій [1].

На нашу думку, вирішення зазначеного питання має комплексний характер. Передусім потрібно запропонувати механізм визначення частки чистої енергії, виробленої з біомаси при її спільному спалюванні з вугіллям, на яку має нараховуватись «зелений» тариф. Це стане основою методики з нарахування на неї «зеленого» тарифу.

Якщо теплотворна здатність біомаси та вугілля відома, то розрахунок виконується за допомогою енергетичного балансу

$$\mathrm{E_b} = \frac{X_b \cdot Q_b}{X_b \cdot Q_b + X_c \cdot Q_c} \cdot E_{total} \qquad (1)$$

де: $\mathrm{x_c} = 1 - \mathrm{x}_b$ – частка вугілля;

E_{total} (кВт·год) – загальна вироблена електроенергія;

Q_b , Q_c (кДж/кг) − нижча теплота згоряння біомаси та вугілля відповідно, при цьому частка біомаси визначається як

$$X_b = \frac{Q_c - Q_{mix}}{Q_c - Q_b} \cdot \beta_{ic} \quad (2)$$

Q_{mix} (кДж/кг) − нижча теплота згоряння суміші біомаси та вугілля;

β_{ic} − коефіцієнт інтенсівності спалювання, визначається розрахунковим шляхом, з урахуванням типу палива, конструкції камери згоряння, режиму спалювання

$$Q_b = Q_{b,\text{висуш}} \, (1 - W_b) \quad (3)$$

$Q_{b,\text{висуш}}$ (кДж/кг) − теплота згоряння сухої біомаси;

W_b (%) − вологість біомаси.

Отже, необхідно внести зміни й доповнення до статті 9^1 Закону України «Про ринок електричної енергії» [4]: «зелений» тариф для суб'єктів господарювання, які виробляють електричну енергію з біомаси, а також з частки біомаси при її спільному спалюванні з вугіллям встановлюється на рівні роздрібного тарифу для споживачів другого класу напруги на січень 2009 року, помноженого на коефіцієнт «зеленого» тарифу для електричної енергії, виробленої з біомаси, а також частки біомаси при її спільному спалюванні з вугіллям. Частка біомаси при її спільному спалюванні з вугіллям, визначається за методикою, затвердженою НКРЕ КП».

На нашу думку, це також сприятиме впровадженню технологій з виготовлення пелет з рослинних залишків відразу на полі за допомогою спеціальної техніки, зокрема комбайна Metitron 560 (Німецька компанія CSP Laser), Premos 5000 (компанія KRONE, Німеччина) [5].

ПОСИЛАННЯ

1. Матвійчук О. С., Розен В. П., Соколовська Н. І. «Щодо деяких перспектив використання біомаси у розвитку систем централізованого теплопостачання». Енергетика: економіка, технології, екологія. 2024. № 3. С. 163−169.
2. Чернявський М. В., Мірошніченко Є. С., Провалов Ю. В., Косячков О. В. «Особливості та досвід переведення газомазутних котлів промислових ТЕЦ на спалювання біомаси та газового вугілля», ISSN 2413-7723. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2024. № 3. С. 44−54.
3. Chernyavskyy M. V., Dunayevska N. I., Provalov O. Yu., Miroshnychenko Ye. S. Scientific basis and technologies of anthracite replacement at thermal power plants. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2020. No 3. P. 33–40. DOI: 10.33271/nvngu/2020-3/033.
4. «Про ринок електричної енергії»: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-17#Text (дата звернення: 04.03.2025).
5. Виготовляємо пелету на ходу. Https://www. AgroTimes › article › vygotovlyayemo-peletu-na-hodu(дата звернення: 07.03.2025).

УДК 662.6:504.06

ПАЛИВНІ ХАРАКТРИСТИКИ БІОМАСИ ОБЛІПИХИ КРУШИНОВИДНОЇ, ВИРОЩЕНОЇ НА ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНИХ НАФТОЗАБРУДНЕНИХ ҐРУНТАХ

Л. З. Шевчик-Костюк[1], О. І. Романюк[2], І. В. Ощаповський[3]

[1, 2]Відділення фізико-хімії горючих копалин Інституту фізико-органічної хімії і вуглехімії ім. Л. М. Литвиненка НАН України,
вул. Наукова, 3а, м. Львів, 79060, Україна,
[3]Інститут ядерної фізики ім. Генрика Неводнічанського Польської Академії Наук,
вул. Радзіковського, 152, 31–342 Краків, Польща
тел.: (096) 241-79-03, e-mail: lesyashevchik@gmail.com

У роботі наведено результати дослідження основних паливних характеристик біомаси фіторемедіанта обліпихи крушиновидної, вирощеної на техногенно порушених нафтозабруднених землях з метою оцінки її потенціалу для виробництва твердого біопалива.

Ключові слова: *тверде біопаливо, обліпиха крушиновидна, біомаса, паливні характеристики, біоенергетика, енергетичні культури, техногенно порушені землі.*

FUEL PROPERTIES OF BIOMASS OF HYPPOPHAE RHAMNOIDES PLANTS, GROWN ON TECHNOLOGICALLY DISTURBED OIL-POLLUTED SOILS

L. Shevchyk-Kostiuk[1], O. Romaniuk[2], I. Oshchapovsky[3]

[1, 2]Department of Physical Chemistry of Fossil Fuels of the Institute of Physical-Organic Chemistry and Coal Chemistry named after L. M. Lytvynenko of the National Academy of Sciences of Ukraine,
3A Naukova Str., Lviv, 79060, Ukraine,
[3]Henryk Niewodniczanski Institute of Nuclear Physics, Polish Academy of Sciences,
Radzikowskiego 152, 31–342 Kraków, Poland
phone: (096) 241-79-03, e-mail: lesyashevchik@gmail.com

The paper presents the results of research on the fuel properties of biomass of Hippophae rhamnoides plants, grown on technologically disturbed oil-polluted soils, to assess its potential for the production of solid biofuels.

Key words: *solid biofuel, Hyppophae rhamnoides, biomass, fuel properties, bioenergetics, energy crops, technologically damaged soil.*

ORCID: [1]0000-0002-6394-8742; [2]0000-0002-6249-2683, [3]0000-0001-5845-5831

Фіторемедіація техногенно порушених земель за участі енергетичних культур є інноваційною стратегією. Продукт фіторемедіаційних технологій, рослинна біомаса, розглядається як джерело відновлюваної енергії.

Україна має значний потенціал вирощування енергетичних культур, який обумовлений ґрунтово-кліматичними умовами та наявністю понпд 4 млн га малопродуктивних, техногенно порушених земель [1]. Деградовані порушені землі, що утворились внаслідок видобування корисних копалин, шахтні відвали можуть бути альтернативним місцем для створення енергетичних плантацій. Однак не всі відомі енергетичні культури можуть рости в таких умовах і продукувати високі врожаї якісної біомаси. Доведено, що обліпиха крушиновидна здатна рости на техногенних відвальних нафтозабруднених ґрунтах озокеритовидобутку, відновлювати їх та інтенсивно накопичувати біомасу [2]. Однак енергетичний потенціал біомаси обліпихи, вирощеної на техногенно порушених нафтозабруднених землях не досліджено, відомо лише про паливні характеристики гілок обліпихи як агровідходів при виробництві ягід [3].

Мета роботи – визначити паливні характеристики та оцінити якість біомаси обліпихи крушиновидної, вирощеної на техногенно порушених нафтозабруднених землях, для виробництва твердого біопалива.

Досліджувалась надземна біомаса обліпихи крушиновидної (*Hippophae rhamnoides* L.), вирощеної на техногенних, нафтозабруднених, відвальних ґрунтах озокеритовидобутку м. Борислава. Відвали озокеритовидобутку різного рельєфу насипні засолені забруднені комплексом шкідливих речовин: нафтовими вуглеводнями 0,3–12 % та важкими металами [4].

Рослинну біомасу для досліджень зібрано на початку грудня з трьох експериментальних фіторемедіаційних ділянок на четвертий рік росту.

Встановлено, що відразу після зрізання вологість рослинної біомаси становить 40,68 %. Дослідження зольності біомаси обліпихи показали, що зольність сухої чотирирічної біомаси обліпихи є досить низькою і становить 1,40 %. Обліпиха крушиновидна, вирощена на нафтозабруднених землях, має високу теплоту згоряння – 20,60 Мдж/кг. Цей показник є вищим за теплоту згорання відомих енергетичних рослин, яка коливається в межах 16–19 Мдж/кг [5, 6].

Отримані дані вказують на те, що біомаса обліпихи крушиновидної характеризується якісними паливними характеристиками і може бути використана як сировина для виробництва твердого біопалива (пелет, брикетів). Обліпиха крушиновидна може бути потенційною енергетичною культурою, яка здатна зростати й накопичувати якісну біомасу в складних умовах техногенно порушених ґрунтів, забруднених важкими металами та нафтовими вуглеводнями.

Закладання рекультиваційно-енергетичних плантацій обліпихи дозволить ефективно використовувати техногенно порушені землі, зокрема забруднені внаслідок воєнних дій, що покращить екологічний стан у регіонах, зменшить проблему забезпечення енергоресурсами, дасть можливість повернути деградовані землі до цільового вжитку.

ПОСИЛАННЯ

1. Біоенергетична асоціація України [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.uabio.org/
2. Шевчик Л. З., Романюк О. І. Використання обліпихи крушиновидної для фіторемедіації нафтозабруднених ґрунтів. Біологічний вісник МДПУ імені Богдана Хмельницького. 2016. 6(3). С. 472–480. doi: 10.15421/2016120
3. Andersone A., Janceva S., Lauberte L., Zaharova N., Chervenkov M., Jurkjane V., Jashina L., Rieksts G., Telysheva G. Granulated Animal Feed and Fuel Based on Sea Buckthorn Agro-Waste Biomass for Sustainable Berry Production. Sustainability 2023, 15, 11152. https://doi.org/10.3390/su151411152
4. Романюк О. І., Шевчик Л. З. Комплексний екологічний моніторинг нафтозабруднених територій на прикладі м. Борислава. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2013. (5). С. 19–22.
5. Хіврич О. Б., Квак В. М., Каськів В. В., Мамайсур В. В., Макаренко А. С. Енергетичні рослини як альтернатива традиційним видам палива. Агробіологія. 2011. Вип. 6. С. 153–157.
6. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Трибой О. В. Перспективи вирощування та використання енергетичних культур в Україні [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.uabio.org/img/files/docs/position-paper-uabio-10-ua.pdf

УДК 543.57:662.6/.9:628.4.04-405:662.641

ШТУЧНЕ КОМПОЗИТНЕ ПАЛИВО З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ ТА ТОРФУ

Т. В. Корінчевська[1], В. А. Михайлик[2]

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Булаховського, 2, м. Київ, 03164, Україна,
тел.: (044)424-12-26, e-mail: tvkorin@gmail.com

Досліджено теплофізичні та енергетичні властивості штучного палива, виготовленого з горючих складових твердих побутових відходів та торфу. Вивчено вплив компонентів на загальні характеристики палива.

Ключові слова: *паливо, тверді побутові відходи, торф, термічний аналіз, теплота згоряння.*

ARTIFICIAL COMPOSITE FUEL FROM MUNICIPAL SOLID WASTE AND PEAT

T. Korinchevska[1], V. Mykhailyk[2]

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine
2 Bulakhovskogo str., Kyiv, Ukraine, 03164
phone: (044)424-12-26, e-mail: tvkorin@gmail.com

The thermophysical and energy properties of artificial fuel made from combustible components of municipal solid waste and peat were investigeted. The influence of components on the general characteristics of fuel was studied.

Key words: *fuel, municipal solid waste, peat , thermal analysis, calorific value.*

ORCID: [1]0000-0002-6638-4743; [2]0000-0003-2712-1382.

Контроль над твердими побутовими відходами (ТПВ) може обмежити наслідки, повязані з негативним впливом на навколишнє середовище. Ефективним рішенням для поводження з відходами стало їх ефективне використання для виробництва палива. Водночас пошук раціонального складу штучного твердого композитного палива для спалювання у когенераційних енергоустановках обумовив пошук компонентів палива з метою підвищення його якісних характеристик та доступності. Одним із шляхів є виготовлення штучного палива з відновлюваної сировини, а саме деревних та сільськогосподарських відходів, побутових відходів, каналізаційних стоків, спеціально вирощених енергетичних культур, торфу тощо.

У роботі проаналізовано сировину для створення штучного твердого композитного палива на основі горючих компонентів ТПВ (картон, текстиль, пластик) і торфу.

Елементний аналіз компонентів палива [1–3] у перерахунку на суху масу наведено в табл. 1. Можна відзначити, що всі компоненти, окрім поліетилену, можна віднести до лігноцелюлознозної біомаси. За елементним складом вони схожі і мають достатньо високий вміст вуглецю. Це означає, що вказані матеріали мають близькі значення теплотворної здатності, що і підтверджується проведеними вимірами. Поліетилен має найвищий вміст вуглецю й відповідно найвищу теплоту згоряння.

Таблиця 1. Елементний аналіз та властивості компонентів палива

Матеріал	Вуглець C, %	Водень H, %	Кисень O, %	Азот N, %	Сірка S, %	Вологість, %	Зола, % сух. мат.	Нижча теплота згоряння в сухому стані, МДж/кг
Картон	38,72	5,59	40,37	0,46		6,0	7,47	15,2
Поліетилен	86	14				0	1,98	42,5
Тканина	41,19	6,97	50,99	0,01	0,84	7,96	1,05	17,9
Торф	56,1	5,67	35,2	0,81	0,23	11,78	16,31	14,8

Методами термічного аналізу в інтервалі від температури навколишнього середовища до 1000 °C досліджена деструкція компонентів палива. Визначено вологість, зольність, теплоту згоряння зразків (табл. 1), а також температури, що характеризують етапи деструкції (зневоднення, термічне розкладання органічних і мінеральних речовин) та швид-

кість термічного розкладання органічних речовин. Аналіз кінетики термічного розкладання органічних речовин компонентів палива показав, що на першій стадії, за нижчих температур, досить високу швидкість розкладання має картон і текстиль. Активніше розкладання в другій стадії характерне для поліетилену і торфу. Найвищу швидкість розкладання в першій стадії має картон, а в другій – поліетилен. Найвища загальна середня швидкість розкладання органічних речовин виявилась у зразка поліетиленової плівки (2,33 % СМ/хв), а найнижча – у торфу (1,45 % СМ/хв).

На основі результатів досліджень розглянуто два склади палива, які відрізняються вмістом горючих компонентів. Паливо № 1 (рис. 1, а) має в своєму складі 20 % картону, 40 % поліетилену, 10 % тканини та 30 % торфу. Видалення води відбувається в інтервалі 21–179 °С, вологість становить 5,17 %. Термічна деструкція органічних речовин має тристадійний характер. На другій стадії видаляється більша частина органічних сполук зі швидкістю 3,07 % СМ/хв. Розкладання органічних сполук супроводжується інтенсивним газоутворенням, про що свідчать ендотермічні піки з максимумами за 265 та 397 °С (DTA). Вміст мінеральних речовин становить 1,76 % СМ, зольність – 6,50 % СМ, теплота згоряння – 26,29 МДж/кг.

Зменшення вмісту торфу до 10 % і відповідно збільшення вмісту картону до 40 % у складі палива № 2 (рис. 1, б) призводить до зменшення вологості до 3,67 % та зольності до 4,84 % СМ. Розкладання органічних речовин також відбувається в три стадії. Збільшення вмісту картону викликає збільшення інтенсивності на першій стадії розкладання. Теплота згоряння зразка палива становить 26,38 МДж/кг.

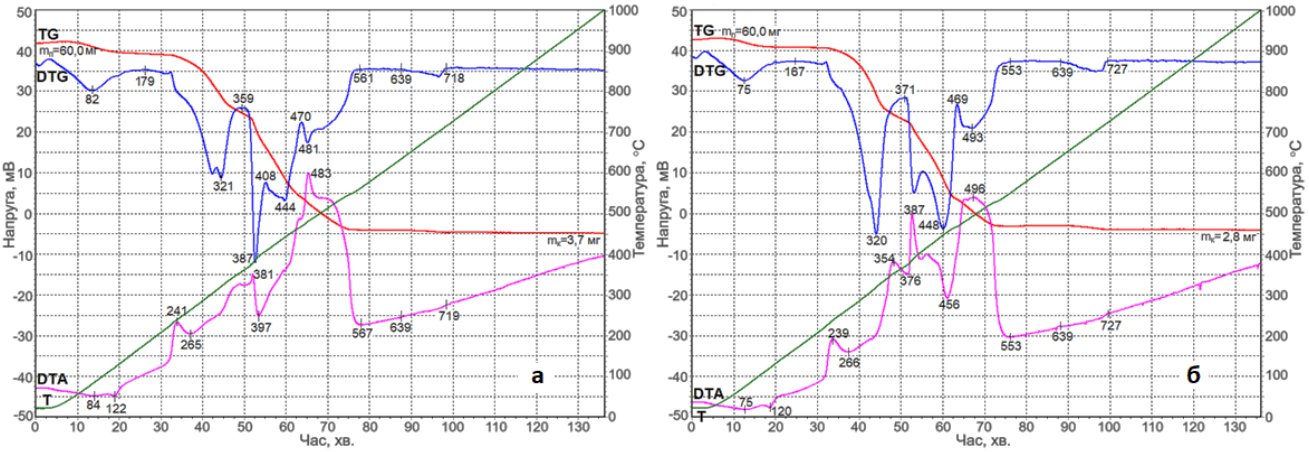


Рис. 1. Дериватограми штучного композитного палива № 1 (а) та № 2 (б)

Аналіз отриманих даних дозволив встановити, що на підвищення теплоти згоряння палива найістотніше впливає вміст поліетилену. Окремою перевагою поліетилену є його низька зольність та відсутність у складі води. Проте потрібно враховувати, що розкладання поліетилену викликає виділення великої кількості летких продуктів згоряння, що місять значну кількість небезпечних речовин, знешкодження яких потребує особливого температурного режиму.

Додавання торфу до палива викликає зсув температури повного зневоднення та закінчення термічного розкладання органічних речовин в область вищих температур. Оскільки інтенсивність розкладання торфу й поліетилену вища на другій стадії, то й, відповідно, інтенсивність розкладання композитного палива вища на другій стадії. Зі збільшенням вмісту торфу зростає як вологість, так і зольність палива.

При використанні торфу як паливного компонента слід враховувати зольність торфу, яка залежить від його виду та родовища і може досягати 3–40 %, що буде впливати на зольність палива.

ПОСИЛАННЯ

1. Combustion and air emissions from co-firing a wood biomass, a Canadian peat and a Canadian lignite coal in a bubbling fluidised bed combustor / C. Badour et al. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2011. Vol. 90. No. 5. P. 1170–1177. URL: https://doi.org/10.1002/cjce.20620 (date of access: 11.02.2025).
2. Salvador S., Quintard M., David C. Combustion of a substitution fuel made of cardboard and polyethylene: influence of the mix characteristics–experimental approach. *Fuel*. 2004. Vol. 83. No. 4-5. P. 451–462. URL: https://doi.org/10.1016/j.fuel.2003.10.004 (date of access: 11.02.2025).
3. Ansah E., Wang L., Shahbazi A. Thermogravimetric and calorimetric characteristics during co-pyrolysis of municipal solid waste components. *Waste Management*. 2016. Vol. 56. P. 196–206. URL: https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.06.015 (date of access: 11.02.2025).

УДК 662.7:661.9

ВИКОРИСТАННЯ ШТУЧНОГО ТВЕРДОГО ПАЛИВА RDF З ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ (ТПВ)

В. М. Чмель[1], І. П. Новікова[2]

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03052, Україна,
тел.+38(066)780-00-07, +38(063)103-30-36
e-mail: chmel.valerii@gmail.com, novikovaines@gmail.com

З огляду на паливні характеристики та особливості твердих побутових відходів показана можливість їх використання як палива у двостадійному процесі спалювання в режимі самозаймання.

***Ключові слова**. Тверді побутові відходи, штучне паливо, теплота згоряння, гранулометричний склад, фронт полум'я, дифузійний факел.*

USE OF ARTIFCIAL SOLIDFUEL RDF FROM DOMESTIC SOLID WASTE (MSW)

V. Chmel[1], I. Novikova[2]

Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Science of Ukraine, 2a Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine,
phone.+38(066)780-00-07, +38(063)103-30-36
03052, e-mail: chmel.valerii@gmail.com, novikovaines@gmail.com

Taking into account the fuel characteristic and features of solid household waste, the possibility of their use as fuel during a two – stage combustion process in the mode.

***Key words.** Solid household, artificial fuel, heat of combustion, Granulometric composition, flame front, diffusion torch.*

ORCID: [1]0000-0003-1394-7239, [2]0000-0001-9612-286X.

Тверді міські відходи складаються з продуктів життєдіяльності людини, а саме: побутових – 1,1 кг/добу, торговельних – 0,6 кг/добу, промислових – 1,4 кг/добу та громіздких речей – 0,1 кг/добу. За добу на 1 людину припадає 3,2 кг відходів, а місто з кількістю мешканців 20 000 збирає за добу 64 т відходів [1, 2].

Міські відходи за своїм складом неоднорідні. У табл. 1 [3]: наведено морфологічний склад змішаних ТПВ, що, як видно, включають різні відходи, як метали, так і органічні речовини. При спалюванні останніх разом з полімерними матеріалами утворюються діоксини та фуран, які шкідливі для навколишнього середовища та людини. Тому як паливо доцільно використовувати побутові відходи переважно зі сміття.

Внаслідок воєнних дій, які веде росія на території України, на початок 2024 року пошкоджено чи зруйновано понад 50 % житлового фонду. Відповідно до цього Кабінет Міністрів України затвердив ПОРЯДОК поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій [4].

Одним з компонентів від руйнування є деревина. Згідно з ПОРЯДКОМ вона може бути використана для створення арболіту, деревних пластиків, теплоізоляційних та звукоізоляційних матеріалів (плит), деревостружкових плит і паливних брикетів.

Штучне паливо, створене з цих відходів, може бути використане для заміщення природного газу в теплоенергетичному балансі.

Сміття складається з речовини рослинного та тваринного походження: це папір, картон, залишки їжі, взуття тощо.

Основна складова органічної маси сміття, як і всієї біомаси, – вуглець та кисень, які кількісно майже відповідають складу органічної маси деревини. Відмінним є наявність сірки та більший вміст мінеральної частки (золи) в деяких відходах через їх штучне походження при технологічних процесах виробництва.

Водночас сміття містить в собі матеріали, які можуть бути використані як сировина для виробництва корисної продукції та енергії. З цією метою його сортирують і відбирають сировину: метал, папір тощо. Невідсортовані залишки сміття можуть бути використані як паливо для отримання теплової енергії.

Склад невідсортованих залишків сміття по м. Києву наданий компанією «ГРІНКО-ЦЕНТР» (м. Київ), такий: деревина – 20 %, мотлох – 26 %, гума – 6 %, пінопласт – 8 %, харчові відходи – 40 %. Теплота згоряння невідсортованих залишків сміття сягає 3060 ккал/кг (12 800 кДж/кг) за вологості до 35 % та зольності до 5 % [5].

Таблиця 1. Морфологічний склад змішаних ТПВ (м. Київ)

№	Найменування компонента відходів	Вміст компоненту у міських залишків ТПВ, %	Вологість W, %	Зола A, %
1	Папір, картон	13,2	11,0	5,38
2	Полімери	9,49	10,0	20,0
3	Метали (чорні, кольорові)	1,07	3,0	96,0
4	Скло	13,2	2,0	97,2
5	Текстиль	2,13	10,0	2,2
6	Шкіра, гума	1,08	2,0	9,88
7	Деревина	1,55	30,0	0,8
8	Харчові відходи	38,42	72,0	4,48
9	Несортований залишок	19,86	40,0	24
	Всього	100	39,04	23,12

Інститутом технічної теплофізики НАН України запропоновано штучне паливо з міських побутових відходів, склад якого наведений в табл. 2. Його гранулометричний склад такий: картон, тканини й поліетиленова плівка нарізані на квадрати з розміром сторін 10–15 мм, рештки кукурудзи подрібнені до розміру часток 2–10 мм.

Загальний вміст поліетилену та пластмас у паливі становить 45,38 %.

Під час спалювання ТПВ необхідно використовувати технології з допалюванням шкідливих та погано тхнущих речовин.

Таблиця 2. Штучне тверде паливо

№	Складові палива	Вміст, %
1	Картон	25
2	Поліетиленова плівка	40
3	Тканина (віскоза 63 %, поліамид 37 %)	9,8
4	Тканина (бавовна 76 % поліестер 21 %, еластин 3 %	2,8
5	Тканина (вовна 50 %, акрил 50 %	2,4
6	Рештки кукурудзи	20

Як показали проведені в Інституті технічної теплофізики НАН України досліди, найефективніше спалювати поліфракційне тверде паливо в прямоточному шарі з допалюванням газової фази та виносу – дрібнодисперсних часток палива й коксового залишку, який має температуру самозаймання, в системі струменів окислювача – повітря.

На цій підставі був створений високофорсований пальниковий пристрій прямоточного (затисненого) шару з двостадійним процесом спалювання палив (рис. 1, а), який був використаний для спалювання невідсортованих ТПВ і штучного палива на їх основі [6].

Для проведення дослідів з урахуванням складу невідсортованого сміття по м. Києву створювались паливні композиції.

Процес горіння паливних композицій та штучного палива в пальниковому пристрої відбувався при загальному коефіцієнті надлишку повітря рівного 1,2–1,4 (рис. 1, б). Для забезпечення температури самозаймання виносу – твердих залишків та шкідливих і погано тхнущих речовин коефіцієнт надлишку повітря в швидкісному шарі дорівнював 0,7–0,8.

У затисненому шарі відбувається неповне згоряння палива, велика кількість дрібнофракційного твердого палива, золи та горючих газів виноситься назовні. Для їх допалювання необхідна подача додаткового повітря. Температура

горючих газів залежить від перепаду тиску на затисненому шарі. Так, при ΔР = 50 Па температура газів – 800 °С, при ΔР = 300 Па – 1090 °С.

На рис. 2 наведений хімічний недопал по довжині факела. Як видно, до 60 % палива вигоряє в межах початкової ділянки, що майже те саме, що і в газовому факелі.

Слід відзначити, що наявність гуми в композиціях вела до появи в продуктах згоряння діоксида сірки. Після добавки в композиції вапняку – крейди, діоксид сірки в продуктах згоряння був відсутній.

Висновки

Проведені досліди показали можливість використовувати побутові відходи як паливо в комунальній енергетиці.

Як показують розрахунки, використання побутових відходів як паливо дасть змогу місту з 20 000 мешканцями за рік заощадити 8,25 тис. т у. п.

а *б*

Рис. 1: а – твердопаливний пальниковий пристрій затисненого шару, б – факел ТПВ

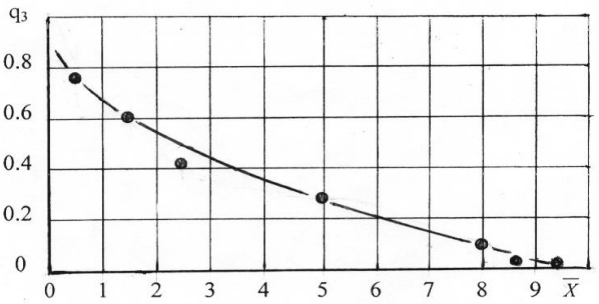


Рис. 2. Зміна хімічного недопалу по довжині факела

ПОСИЛАННЯ:

1. Гуляев Н. Ф. Удаление, обезвреживание и переработка бытового мусора. М.: Стройиздат, 1973. 326 с.
2. Сбор, удаление, обезвреживание бытовых отходов. Пер. с нем. М.: Стройиздат, 1971. 288 с.
3. КП «Київкомунсервіс» Морфологічний склад ТПВ м. Києва. http://kks.kyik.ua>2018/08
4. Постанова КМУ від 27.09.2022 № 1073 «про затвердження порядку поводження з відходами, що утворились у зв'язку з пошкодженням (руйнуванням) будівель та споруд внаслідок бойових дій або проведенням робіт з ліквідації їх наслідків та внесення змін до деяких постанов Кабінету Міністрів України».
5. Чмель В. М., Новікова І. П. Брикетування біомаси. Відновлювана енергетика. 2007. № 4(8). С. 98–103.
6. Патент на корисну модель «Твердопаливний пальниковий пристрій затисненого шару» № 155891 від 17.04.2024. Бюл. № 1. Чмель В. М., Новікова І. П., Снєжкін Ю. Ф., Колісніченко О. М.

УДК 621.311.25

УДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ КОНДЕНСАТОРІВ ТУРБІН

В. Ряполов[1], Т. Полякова[1]

[1]Національний технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2 тел.+38(057)707-66-34, viacheslav.riapolov@ieee.khpi.edu.ua, tetiana.poliakova@khpi.edu.ua

У сучасних умовах експлуатації турбінного устаткування намітилися тенденції в зниженні можливості виробництва електричної енергії на великих теплових електростанціях які використовують замкнуті цикли охолодження конденсаторів парових турбін.

Ключові слова: *підвищення середньої температури повітря, температурний напір в конденсаторі, температура охолоджувальної води на вході в конденсатор, конденсатор парової турбіни.*

Витрата охолоджувальної води для конденсатора визначається за формулою:

$$W = \frac{D_к (i_к - i_к^{'})}{(t_в^{''} - t_в^{'}) c_в},$$

де: W – витрата охолоджувальної води (м3/с);
Dк – витрата пару, що конденсується (кг/с);
ік – ентальпія пару в конденсаторі (кДж/кг);
і'к – ентальпія конденсату (кДж/кг);
Св – теплоємність охолоджувальної води (кДж/(кг*К);
t''в – температура охолоджувальної води на виході з конденсатора (оС);
t'в – температура охолоджувальної води на вході в конденсатор (оС);
Основним параметром, який враховують, проєктуючи конденсатор і його ефективну роботу, є площа поверхні охолодження конденсатора – Fк (м2).
Вона розраховується за рівнянням теплопередачі: FK=Q/K*Δt
де: Q – кількість тепла, що віддає пар або що сприймає охолоджувальна вода (кДж/с);
к – коефіцієнт теплопередачі (кВт/м2 * К);
Δtср – температурний напір в конденсаторі (оС);
Температурний напір в конденсаторі розраховується за формулою:

$$\Delta t_{ср} = t_{нп} - (t_в^{'} + t_в^{''})/2,$$

де tнп – температура насиченого пару.
Таким чином, можна дійти висновку, що при підвищенні температури охолоджувальної води на вході в конденсатор за постійного нагріву цієї води в конденсаторі (8…12 оС) температурний напір буде зменшуватись, що при постійній поверхні охолодження негативно впливатиме на процес конденсації пара.
Або в разі збереження величини температурного напору підвищиться температура насиченого пару, що безпосередньо впливає на потужність турбіни Ne, оскільки:

$$N_e = DH_0\eta_{oe}.$$

де: D – витрата пара на турбіну (кг/с);
Но – тепловий перепад (кДж/кг), який дорівнює: Но = іо – і нп,
де іо – ентальпія гострого пара (кДж/кг);
і нп – ентальпія насиченого пара (кДж/кг);
ηое – загальний ККД турбоагрегата;
якщо враховувати що і нп = f(tнп), то залежність наявна.
Одною з властивостей води є те, що її теплоємність зменшується в проміжку температур від 0 до 35 оС. Це ще один з факторів який впливає на погіршення роботи конденсатора.
Треба враховувати, що останніми роками спостерігається підвищення середньої температури повітря, а також зміни в сезонній динаміці температур. Ці зміни можуть мати важливі наслідки для природи та людей і необхідно розробляти ефективні заходи з адаптації існуючого обладнання до змін клімату.
Одним з напрямків адаптації існуючого обладнання є модернізація теплообмінного обладнання з метою підвищення ефективності його роботи в змінених умовах.

IMPROVEMENT OF THE TURBINE CONDENSER COOLING SYSTEM

V. Riapolov[1], T. Poliakova[1]

[1]National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
[2], Kyrpychova Str., Kharkiv 61002, tel: +38(057)707-66-34, viacheslav.riapolov@ieee.khpi.edu.ua, tetiana.poliakova@khpi.edu.ua

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used based on the study of physical and chemical properties of low-boiling working bodies and their cost.

Key words: *increase in average air temperature, temperature head in the condenser, cooling water temperature at the condenser inlet, steam turbine condensers.*

Consumption of cooling water for the condenser is determined by the following formula:

$$W = \frac{D_к (i_к - i'_к)}{(t''_в - t'_в) c_в},$$

where: W - means the cooling water consumption (m^3/s);

$D_к$ - means the condensable steam consumption (kg/s);

$i_к$ - means the enthalpy of steam in the capacitor (kJ/kg);

$i'_к$ - means the condensate enthalpy (kJ/kg);

$C_в$ - means the heat capacity of the cooling water (kJ/(kg*K);

$t''_в$ - means the cooling water temperature at the condenser outlet (°C);

$t'_в$ - means the cooling water temperature at the condenser inlet (°C).

The primary parameter that is considered upon design process of the condenser, with the objective to ensure its effective operation, is the cooling surface area of the condenser – $F_к$ (m^2).

It is calculated by the heat transfer equation: $F_к=Q/к*\Delta t$

where: Q - means the amount of the heat given off by steam or taken up by the cooling water (kJ/s);

к means the heat transfer coefficient ($kW/m^2 * K$);

$\Delta t_{ср}$ - means the temperature head in the condenser (°C);

Temperature head in the condenser is calculated by the formula:

$$\Delta t_{ср}=t_{нп}-(t'_в+t''_в)/2,$$

where - $t_{нп}$ means the saturated steam temperature.

Thus, it can be concluded that upon an increase in the temperature of the cooling water at the inlet to the condenser, with the constant heating of this water in the condenser (8...12 °C), the temperature head will decrease. This will affect the steam condensation process with the constant cooling surface.

Alternatively, while the temperature head is maintained, the saturated steam temperature will increase. This directly affects the power of the turbine N_e:

$$N_e=DH_0\eta_{oe},$$

where: D - means the steam consumption per turbine (kg/s);

H_O - means the thermal drop (kJ/kg), which is equal to: $H_O = i_O – i_{нп}$,

where i_O - means the enthalpy of acute steam (kJ/kg);

$i_{нп}$ - means the enthalpy of saturated steam (kJ/kg);

η_{oe} - means the overall efficiency of the turbine unit;

considering that $i_{нп} = f(t_{нп})$, the dependency is obvious.

One of the properties of water is that its heat capacity decreases within the temperature range of 0 to 35 °C. This phenomenon is another contributing factor to the deterioration of the condenser. It is imperative to acknowledge the observed increase in average air temperature and the shifts in seasonal temperature dynamics in recent years. These changes can have significant consequences for both the natural environment and human society. Therefore, it is essential to develop effective arrangements to adapt the current equipment to climate changes. One of the areas of adaptation involves modernization of the heat exchange equipment, with the aim of enhancing its efficiency in altered conditions.

УДК 502.21

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ЗАВАНТАЖЕННЯ БІОГАЗОВОГО РЕАКТОРА

О. А. Яременко[1], Г. А. Голуб[2]

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна,
тел.: (096) 685-44-92, e-mail: oxanalutak@ukr.net

Наведено результати дослідження виливу періодичності завантаження біогазового реактора на вихід біометану та біогазу.

Ключові слова: *біогазовий реактор; біогаз; біометан; періодичність завантаження.*

METHOD FOR DETERMINING OF THE BIOGAS REACTOR LOADING PERIOD

O. Yremenko[1], G. Golub[2]

Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine,
20a Hnata Khotkevicha str., Kyiv, Ukraine, 02094, Ukraine,
phone: (096) 685-44-92, e-mail: oxanalutak@ukr.net

The results of the study of the effect of the biogas reactor loading frequency on the output of biomethane and biogas are presented.

Key words: *biogas reactor; biogas; biomethane; loading frequency.*

ORCID: [1]0000-0001-5440-4682; [2]0000-0002-2388-0405

Метою досліджень є визначення впливу параметрів та режимів роботи біогазової установки під час метанового зброджування осаду стічних вод систем штучного вирощування риби на вихід біометану та біогазу.

В умовах анаеробного зброджування в біогазовому реакторі декількох порцій осаду, які перебувають на різних стадіях рівня розкладу СОР, а відповідно і питомого виходу біометану, визначення питомого виходу біометану можна провести на основі розрахункового значення інтегрального середнього питомого виходу біометану за таким виразом:

$$\gamma = 803{,}936\left[1 - exp(-0{,}207\tau_{\text{ЗБ}})\frac{\tau_3}{\tau_{\text{ЗБ}} + \tau_3}\sum_{i=0}^{n=\frac{\tau_{\text{ЗБ}}}{\tau_3}} exp(0{,}207\tau_3 i)\right],$$

де γ – питомий вихід біометану на одиницю маси розкладеної СОР, м³ (н.у.)/т СОРр; $\tau_{\text{ЗБ}}$ – час зброджування (загальний час перебування біомаси в реакторі), діб; τ_3 – періодичність завантаження біогазового реактора, діб; $i = 0 \ldots n = 0 \ldots \frac{\tau_{\text{ЗБ}}}{\tau_3}$ – нумерація завантажених порцій біомаси в біогазовий реактор; $n = \frac{\tau_{\text{ЗБ}}}{\tau_3}$ – кількість завантажених порцій біомаси в біогазовому реакторі, од.

Питомий вихід біометану на одиницю біомаси в реакторі залежить від вмісту органічної маси в реакторі і визначається швидкістю розкладу органічної біомаси осаду та питомим виходом біометану з одиниці розкладеної органічної біомаси. Це може бути формалізовано так:

$$\eta = \rho\left(1 - \frac{W}{100}\right)\frac{VS}{100}\frac{d\alpha}{d\tau_F}\gamma$$

де η – питомий вихід біометану на одиницю біомаси в біогазовому реакторі, м³/т добу-1; ρ – густина біомаси, т/м³ цим; W – вологість біомаси, %; VS – вміст сухої органічної речовини в біомасі.

Розрахунок питомого виходу біометану на одиницю біомаси в біогазовому реакторі згідно з цим виразом наведено на рис. 1.

Встановлено, що при зброджуванні протягом 21 доби питомий вихід біометану під час анаеробної ферментації має оптимальне значення валежно від періодичності завантаження біогазового реактора. Це значення становить 1,48–

1,5 м^3 біометану на один кубічний метр біомаси в реакторі за одну добу при періодичності завантаження біогазового реактора один раз за час від 4,5 до 6 діб. З урахуванням щільності біомаси на рівні 1,05 т/м^3 питомий вихід біометану становитиме 1,42–1,43 м^3 біометану на одну тонну біомаси в реакторі за одну добу. А з урахуванням концентрації біометану в біогазі на рівні 74–75 % значення виходу біогазу з реактора за нормальних умов становитиме 1,9–1,92 м^3 на одну тонну біомаси в реакторі за одну добу, що не більше ніж на 17 % перевищує середні значення, що наводяться в джерелах літератури щодо дослідження виходу біогазу.

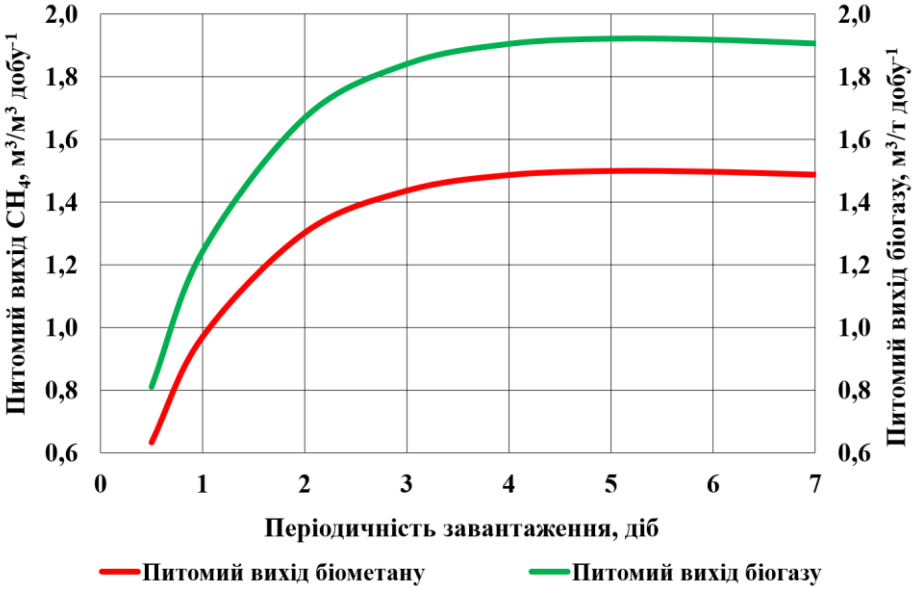


Рис. 1. Питомий вихід біометану під час анаеробної ферментації та питомий вихід біометану на одиницю біомаси залежно від періодичності завантаження біогазового реактора при часі зброджування $\tau_{ЗБ}$ = 21 доба

Розрахунок економічних показників виробництва біометану з осаду, отриманого після гравітаційного ущільнення стічних вод систем штучного вирощування риби, показав, що при оптимальному значенні питомого виходу біометану розрахунковий прибуток від виробництва біометану становив 4,29 грн/м^3, а прибуток від виробництва електроенергії на основі біометану – 3,39 грн/кВт год. Впровадження обладнання для підготовки змивної води механічних фільтрів до анаеробного зброджування з метою отримання біогазу з продуктивністю за кількістю змивної води механічних фільтрів 1577 м^3/рік в ТОВ «Аква Систем Органік» дозволило отримати фактичний економічний ефект 10 тис. грн/м^3 ущільненого осаду та додатковий розрахунковий економічний ефект від виробництва електроенергії на основі біометану – 16 тис. грн.

ПОСИЛАННЯ

1. G. Golub, O. Yaremenko, P. Kucheruk, O. Marus, N. Tsyvenkova, V. Nadykto, V. Chuba, Y. Yarosh. Defining indicators for the anaerobic fermentation process of aquaculture wastewater sediments. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2024, 6/8 (132), Energy-saving technologies and equipment, 66-78. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.317019.

2. G. Golub, O. Yaremenko, O. Marus, N. Tsyvenkova, H. Chetveryk. Sedimentation properties of aquaculture wastewater sludge during the cultivation of clarias gariepinus. Відновлювана енергетика. 2025. № 1(80). С. 148–158. DOI: https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).148-158.

3. G. Golub, V. Lutak, O. Kepko, O. Marus, O Yaremenko. Determining impact of difference in price of liquid manure and degestate on production costs of biomethane and electricity. Proceedings of the 20th International Scientific Conference Engineering for Rural Development 2021, Jelgava, Latvia, May 26–28, 2021, 314-319. DOI: 10.22616/ERDev2021.20.TF067.

4. Г. А. Голуб, О. А. Яременко. Методика розрахунку виходу біогазу. Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: матеріали XXII міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 20-21 травня 2021 р.). К.: Інтерсервіс, 2021. 1104 с. С. 847–850.

УДК 662.764

ВИМОГИ ДО ЧИСТОТИ БІОМЕТАНУ

П. А. Голубєв, А. В. Слюзар

Національний університет «Львівська політехніка»,
вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013, Україна,
тел.: (067) 673-05-57, e-mail: Andrii.V.Sliuzar@lpnu.ua

Показано можливість комплексного зменшення вмісту деяких домішок у біогазі у виробництві біометану при застосуванні хінгідронного методу очищення.

Ключові слова: *біометан, біогаз, кисень, сірководень, очищення, хінгідронний метод.*

REQUIREMENTS FOR THE QUALITY OF BIOMETHANE

P. Holubiev, A. Slyuzar

Lviv Polytechnic National University,
12 S.Bandery str., Lviv, Ukraine, 79013
phone: (067) 673-05-57, e-mail: Andrii.V.Sliuzar@lpnu.ua

The possibility of a comprehensive reduction in the content of some impurities in biogas when using the quinhydrone purification method is shown.

Key words: *biomethane, biogas, oxygen, hydrogen sulfide, purification, quinhydrone method.*

ORCID: [1]0000-0003-4136-4030

Нещодавно в Україні розроблено й затверджено «Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та план заходів з його виконання», де значна увага приділена біогазу й біометану як енергетичним газам для виробництва теплової та електричної енергії, а також біометану як замінніку різних видів моторних палив у транспортному секторі. Варто розглядати можливості транспортування і наступного експорту біометану. Біогаз за своїми фізико-хімічними характеристиками не відповідає встановленим нормам, і тому не може бути поданий до газових мереж. Біогаз має бути очищений до біометану, тобто вміст CO2, кисню та інших складових біогазу має бути знижений, а рівень метану підвищений до рівня не менше 90 %. Європейський і відповідний йому стандарт України [1] визначили вимоги та методи випробування біометану на вході в мережі природного газу.

Технологій очищення газів від конкретних домішок є багато. Для виробництва біометану варто комплексно розглядати очищення біогазу від усіх компонентів. Так, для очищення біогазу від сірководню на біогазових станціях часто використовують біологічну десульфуризацію, яка є досить ефективною, але для належного її функціонування потрібно вводити кисень, а це несе навантаження на наступні стадії біометанового виробництва, бо вміст кисню обмежений. Зменшення на порядок нормативного значення максимального вмісту кисню в біометані (з 0,02 до 0,2 %) дало змогу в 2023 році запустити першу в Україні біометанову установку. Іншою важливою стадією одержання біометану є очищення біогазу від сірководню й вуглекислого газу. Сірководень (H_2S) через його токсичність, високу реакційну здатність і корозійну активність потрібно тільки знешкодити (макс. вміст 0,006 г/м3), а вуглекислий газ (макс. 2 %) потрібно правильно утилізувати, тобто використовувати безпосередньо або як сировину для органічних синтезів (одержання метанолу, метану тощо). Тому часто пропонується попередня очистка від сірководню перед очищенням біогазу від вуглекислого газу, наприклад, широковживаним мембранним методом. Таким методом може бути хінгідронний метод очищення газів від сірководню [2]. Важливими перевагами хінгідронного методу є висока ефективність (99,5 %), утилізація сірководню до дрібнодисперсної сірки, яка може стати ефективним компонентом у дігестаті, низькі втрати вуглекислого газу, можливість зменшення вмісту кисню в газі (хімічна регенерація) або продукування H2 для метанізації CO2 (електрохімічна регенерація хінгідронного поглинального розчину).

ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ EN 16723-1:2023 Природний газ і біометан для використання в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу. Частина 1. Технічні характеристики біометану для закачування в мережу природного газу (EN 16723-1:2016, IDT) URL : https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0055774-23#Text.
2. Слюзар А. В., Знак З. О., Калимон Я. А., Буклів Р. Л. Методи очищення і перероблення сірководеньвмісних газів (огляд). Voprosy khimii i khimicheskoi tekhnologii. 2019. № 3. С. 83–97. https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-124-3-83-97

МЕТОД ХІМІЧНОЇ ОБРОБКИ СОНЯШНИКОВОГО ЛУШПИННЯ ПЕРОКСИДОМ ВОДНЮ В ЛУЖНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ВИХОДУ БІОГАЗУ

О. О. Костюк[1], І. В. Дем'яненко[2]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (096) 838-45-51, e-mail: kostiuk.oleksandr@lll.kpi.ua

У роботі розглядається необхідність утилізації лушпиння соняшника, доцільність його використання як косубстрату для метанового бродіння з огляду на його склад, а також вибрано метод видалення незброджуваної частини для підвищення рівню виходу біогазу.

Ключові слова: *біогаз, соняшникове лушпиння, утилізація відходів, метанове бродіння, анаеробні умови, попередня обробка, пероксид водню, гідроксид натрію.*

METHOD OF CHEMICAL TREATMENT OF SUNFLOWER HUSK WITH HYDROGEN PEROXIDE IN ALKALINE ENVIRONMENT TO INCREASE BIOGAS YIELD

O. Kostiuk[1], I. Demianenko[2]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (096) 838-45-51, e-mail: kostiuk.oleksandr@lll.kpi.ua

The paper considers the importance of sunflower husk utilization, the viability of its use as a co-substrate for methane fermentation based on its composition, and proposes a method for removing the non-fermentable part to increase the level of biogas yield.

Key words: *biogas, sunflower husks, waste disposal, methane fermentation, anaerobic conditions, pretreatment, hydrogen peroxide, sodium hydroxide.*

ORCID: [1]0009-0003-6480-5115 [2]0000-0002-0832-3619

В Україні щорічно збирається більше 10 млн т соняшнику, з насіння якого отримують цінний харчовий і технічний продукт – олію. У процесі отримання соняшникової олії невід'ємним відходом є лушпиння. Коефіцієнт утворення лушпиння становить 0,17 [1], що створює щороку близько 2 млн т соняшникового лушпиння, яке необхідно утилізувати. До 60 % отриманого лушпиння використовують або як паливо для котлів безпосередньо на виробництві, або для гранулювання й брикетування, або як додаток для підстилки сільськогосподарським тваринам. Проте все ще висока частка лушпиння потребує утилізації, тому необхідно шукати шляхи вирішення цієї проблеми.

Успішне використання соняшникового лушпиння як твердого палива пов'язане з високою теплотою згоряння і доволі низькою зольністю. Проводили численні дослідження можливості отримання з лушпиння біовугілля як ефективного сорбенту антибіотиків і важких металів з навколишнього середовища, а також його використання як добавку до ґрунтів для покращення їх водоутримувальних властивостей [2, 3]. Ще його використовують як основний компонент селективних середовищ і як кормову добавку для сільськогосподарських тварин [4, 5]. Проте питання з конвертації соняшникового лушпиння в рідкі або газоподібні види біопалива є мало дослідженими, хоча ця сировина має потенціал.

Лушпиння – це лігноцелюлозна сировина, яка багата на карбон, містить мікроелементи та вітаміни, тому вона може стати ефективним додатковим компонентом середовища для розвитку асоціації мікроорганізмів, що утворюють біогаз. Лігнін у складі лушпиння не зброджується і зменшує доступність мікроорганізмів до целюлози і геміцелюлози. Вміст лігніну в соняшниковому лушпинні оцінюється приблизно в 20 %. Його видалення має полегшити процес анаеробного зброджування й збільшити вихід біогазу, тому пропонується проведення попередньої обробки соняшникового лушпиння для процесу делігніфікації зі збереженням поживної цінності сировини. Негідролізована целюлоза хоч і зброджується довше, але вихід біогазу є рівномірнішим, оскільки середовище не закислюється надто швидко внаслідок життєдіяльності ацетогенів [6].

Основні доцільні методи делігніфікації соняшникового лушпиння – біологічний та хімічний. Біологічний метод передбачає використання ферментних комплексів грибів білої гнилі, які вирізняються специфічністю і ефективністю деструкції лігніну. Хоча метод є досить ефективним, але має декілька суттєвих недоліків. До них належать такі: складність виділення потрібного штаму грибів і забезпечення оптимальних умов його культивування; недослідженість впливу продуктів метаболізму грибів білої гнилі на метаногенні бактерії. На відміну від біологічних, хімічні методи делігніфікації є менш селективними, але значно простішими в реалізації. Засновані ці методи на здатності лігніну розчинятися в лугах і його легкій окиснюваності, внаслідок чого відбувається часткове руйнування ефірних зв'язків лігніну з геміцелюлозою [7]. Як один з найдешевших і найпростіших методів пропонується застосування комбінованої обробки лушпиння пероксидом водню в лужному середовищі. Цей метод не потребує складного технологічного обладнання і витрат на нагрівання, передбачає використання недорогих реактивів у малих концентраціях, тому може знайти промислове застосування при доведенні його ефективності.

Попередньо пропонується подрібнити соняшникове лушпиння для збільшення площі контакту з реагентами, а далі витримувати його з постійним перемішуванням у розбавленому водному розчині пероксиду водню (2, 4, 6 % відповідно), який доводиться до рівня pH 10,5 гідроксидом натрію. Гідроксид натрію бурхливо взаємодіє з пероксидом водню з утворенням кисню і тепла, але за рахунок низької концентрації реагентів реакція незначна. У процесі обробки лігнін окиснюється пероксидом і утвореним киснем, що полегшує розчинення лігніну в лужному розчині. Втрати целюлози та геміцелюлози за використання такого комбінованого методу є мінімальними [8], оскільки весь окисник використовується на руйнування зовнішньої частини лігноцелюлозного комплексу – лігніну. Реакцію пропонується проводити не довше 3 год, оскільки пероксид водню є нестабільною речовиною і в лужному середовищі повністю розкладається за цей час, і це робить подальшу обробку недоцільною. Оброблене соняшникове лушпиння відділяють від реакційної суміші фільтруванням з подальшим промиванням водою до нейтрального pH.

Попередня обробка соняшникового лушпиння вибраним методом спрямована на інтенсифікацію процесу отримання біогазу, що може вирішити проблему утилізації лушпиння й одночасно зменшити залежність країни від викопних джерел енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. АНАЛІТИЧНА ЗАПИСКА / Г. Г. Гелетуха та ін. Київ : Біоенергетична асоціація України, 2020. Т. 25: ПЕРСПЕКТИВИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ПОБІЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ ВІД ВИРОЩУВАННЯ СОНЯШНИКУ. 35 с. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/uabio-position-paper-25-ua.pdf (дата звернення: 05.03.2025).
2. Nguyen TB, Nguyen TK, Chen CW, Chen WH, Bui XT, Lam SS, Dong CD. NiCo2O4-loaded sunflower husk-derived biochar as efficient peroxymonosulfate activator for tetracycline removal in water. Bioresour Technol. 2023 Aug;382:129182. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129182. Epub 2023 May 18. PMID: 37210031.
3. Gluba Ł, Rafalska-Przysucha A, Szewczak K, Łukowski M, Szlązak R, Vitková J, Kobyłecki R, Bis Z, Wichliński M, Zarzycki R, Kacprzak A, Usowicz B. Effect of Fine Size-Fractionated Sunflower Husk Biochar on Water Retention Properties of Arable Sandy Soil. Materials (Basel). 2021 Mar 10; 14(6):1335. doi: 10.3390/ma14061335. PMID: 33801976; PMCID: PMC7999494.
4. Khan ZU, Ahmad S, Mokaddas E, Al-Sweih N, Chandy R. Sunflower seed husk agar: a new medium for the differentiation of Candida dubliniensis from Candida albicans. Indian J Med Microbiol. 2005 Jul; 23(3):182-5. doi: 10.4103/0255-0857.16605. PMID: 16100426.
5. Mpendulo CT, Hlatini VA, Ncobela CN, Chimonyo M. Effect of fibrous diets on chemical composition and odours from pig slurry. Asian-Australas J Anim Sci. 2018 Nov; 31(11):1833-1839. doi: 10.5713/ajas.16.0126. Epub 2016 Sep 9. PMID: 27608637; PMCID: PMC6212756.
6. Голуб Н. Б. Переробка біомаси: підручник. Київ. 118 с.
7. Барбаш В. А., Дейкун І. М. Хімія рослинних полімерів: Навчальний посібник. Київ : «Каравела», 2018. С. 227–264. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2020/Barbash_2018_440.pdf (дата звернення: 11.03.2025).
8. Saha BC, Cotta MA. Ethanol production from alkaline peroxide pretreated enzymatically saccharified wheat straw. Biotechnol Prog. 2006 Mar-Apr; 22(2):449-53. doi: 10.1021/bp050310r. PMID: 16599561.

УДК 621.311.25

ПОРІВНЯННЯ СОРГО ТА КУКУРУДЗИ ЯК СИРОВИНИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОЕТАНОЛУ

В. О. Самарін[1], Т. С. Іванова[2], С. П. Циганков[3].

Інститут харчової біотехнології та геноміки НАН України,
вул. Байди-Вишневецького, 2А, м. Київ, 04123, Україна,
тел.: (098) 403-39-05, e-mail: samaa2488@gmail.com

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення хімічних властивостей для порівняння середовища з сорго та кукурудзи для отримання біоетанолу.

Ключові слова: *сорго, кукурудза, середовище, динамічна в'язкість, отримання етанолу, гідро-ферментативна обробка.*

COMPARISON OF SORGHUM AND CORN AS FEEDSTOCKS FOR BIOETHANOL PRODUCTION

V. Samarin[1], T. Ivanova[2], S. Tsygankov[3].

Institute of Food Biotechnology and Genomics NAS of Ukraine,
Baidy Vyshnevetskoho str. 2a, Kyiv, Ukraine, 04123
phone: (098) 403-39-05, e-mail: samaa2488@gmail.com

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used based on the study of chemical properties were used to compare sorghum and corn media for bioethanol production.

Key words: *sorghum, corn, mash, dynamic viscosity, ethanol production, hydro-enzymatic treatment.*

ORCID: [1]0009-0009-7984-038X; [2]0000-0002-5219-8034; [3]0000-0002-4166-4124.

Зростаючий попит на відновлювані джерела енергії стимулює дослідження альтернативних сільськогосподарських культур для виробництва біоетанолу. Кукурудза є основним джерелом крохмалю для біоетанольної промисловості, однак сорго набуває популярності через свою посухостійкість, невибагливість до ґрунтів та конкурентні технологічні властивості [1].

Крохмаль кукурудзи містить 70–75 % амілопектину та 25–30 % амілози, що забезпечує високу швидкість ферментативного гідролізу. Водночас сорго містить більше фенольних сполук, які можуть інгібувати ферментативні процеси, проте характеризується нижчим вмістом білків-проламінів (7–10 проти 8–11 % у кукурудзи), що полегшує ферментативне перетворення [2].

Одним із ключових параметрів ефективності ферментації є динамічна в'язкість середовища. Встановлено, що в'язкість середовища перед ферментацією коливається в межах 40–250 мПа·с, залежно від концентрації сухих речовин і температури. Для кукурудзяного середовища характерна підвищена в'язкість через високий вміст β-глюканів та арабіноксиланів, що ускладнює перемішування. Сорго, навпаки, демонструє нижчу в'язкість, що дає змогу збільшити концентрацію сухих речовин у середовищі до 30–35 %, що надасть більшої продуктивності процесу та підвищить вихід етанолу [3].

З енергетичного погляду виробництво біоетанолу з сорго може бути ефективнішим. Вирощування сорго потребує на 30–40 % менше води та на 20–25 % менше добрив порівняно з кукурудзою, що знижує витрати енергії на агротехнологічний цикл. Крім того, нижча в'язкість середовища зменшує енергоспоживання на етапах перекачування та перемішування, що може скоротити загальні енергетичні витрати процесу на 5–10 %.

Порівняння кінцевого виходу біоетанолу показує, що кукурудза дає 400–420 л/т сировини, тоді як сорго зможе забезпечити 380–400 л/т, залежно від сорту та ферментативної обробки. Використання додаткових ферментів (ксиланаз, β-глюканаз) для сорго дозволяє покращити гідроліз, що компенсує різницю у виході етанолу.

З огляду на вищезазначене сорго має значний потенціал для біоетанольної промисловості, особливо для регіонів з посушливим кліматом. Енергоефективність вирощування, менші технологічні витрати та можливості приготування середовища з підвищеною концентрацією сухих речовин роблять його перспективною альтернативою кукурудзі у сфері відновлюваної енергетики.

ПОСИЛАННЯ

1. Stamenković O. S., Siliveru K., Veljković V.B. Production of biofuels from sorghum. Renew. Sustain. Energy Rev. 2020; 124(7): 109769. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109769
2. Szambelan, K.; Nowak, J.; Szwengiel, A.; Jeleń, H. Comparison of sorghum and maize raw distillates: Factors affecting ethanol efficiency and volatile by-product profile. J. Cereal Sci. 2020; 91: 102863. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102863
3. Zhao R. Z., Bean S. R., Wu S., Wang D., Assessing Fermentation Quality of Grain Sorghum for Fuel Ethanol Production Using Rapid Visco-Analyzer. Cereal Chemistry. 2008; 85(6). DOI: https://doi.org/10.1094/CCHEM-85-6-0830

УДК 622.71; 552.1; 67.03; 620.9

ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ БІОВУГІЛЛЯ

В. Ю. Скосар[1], Н. В. Бурилова[2], С. В. Комаров[3], С. В. Бурилов[4]

Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

Заходи зі збирання рослинної біомаси та розвиток технологій біовугілля можуть покращити енергозабезпечення та зменшити викиди парникових газів в атмосферу. Технологія біовугілля стимулює вдосконалення наукової концепції генезису викопного вугілля.

Ключові слова: *парнікові гази, зменшення викидів діоксиду вуглецю, біовугілля, біочар, генезис викопного вугілля, біомаса.*

SOME PROBLEMS OF USING BIOCOAL

V. Skosar[1], N. Burylova[2], S. Komarov[3], S. Burylov[4]

Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5 Pisargevskogo str., Dnipro, Ukraine, 49005
phone: (066) 731-8618, e-mail: skosarslava@gmail.com

Plant biomass harvesting measures and the development of biocoal technologies can improve energy supply and reduce greenhouse gas emissions. Biocoal technology stimulates the improvement of the scientific concept of the genesis of fossil coal.

Key words: *greenhouse gases, reduction of carbon dioxide emissions, biocoal, biochar, genesis of fossil coal, biomass.*

ORCID: [1]0000-0002-2151-3417; [2]0000-0003-0474-0236; [3]0000-0002-6065-9478; [4]0000-0001-8070-6764

Останнім часом різко загострилася екологічна криза у формі глобального потепління, що пов'язують з антропогенним викидом парникових газів – CO2, CH4 та інших. Наприклад, стверджується, що 2024 рік став найспекотнішим за всю історію спостережень і що космічні супутникі фіксують інтенсивне зростання рівня CO2 на всій планеті. Вчені дійшли висновку, що глобальне потепління занадто швидко виходить з-під контролю, і мета Паризької угоди (не більше 1,5 °C підвищення у порівнянні з доіндустріальним часом) навряд чи може бути досягнута [1]. На жаль, попередження вчених не змусили уряди різних держав і свідоме суспільство відмовитися від використання викопного палива та істотно знизити парникові викиди. Тому дослідники попереджають, що наслідки нагрівання планети будуть катастрофічними для людей і всієї біосфери Землі: моделювання показує, що зміна клімату й забруднення повітря вже до кінця XXI століття можуть призвести до загибелі близько 30 млн людей [2]. Екстремальну спеку в Середземномор'ї влітку 2024 року також пов'язують з глобальним потеплінням, яке зумовлене антропогенними викидами парникових газів. Причому такі кліматичні проблеми, на жаль, відбуватимуться дедалі частіше [3].

Пропонуємо звернути увагу на неконтрольовані викиди парникових газів, що відбуваються в нас перед очима і не пов'язані безпосередньо з виробничими підприємствами чи транспортом. Якщо взяти як приклад міські парки, міські зелені насадження, посадки вздовж доріг, приміські зони, приватні домоволодіння, дачні ділянки, то легко побачити великі території, забруднені опалим листям, сухим гіллям, гниючими деревними частинами. Величезна кількість біомаси гниє на міських сміттєзвалищах, а в спекотну погоду самозаймається і разом з палаючим сміттям забруднює атмосферу димом і різними шкідливими викидами. Усе це разом насичує атмосферу і природне середовище парниковими газами – CO2, CH4, частинками сажі – C (рис. 1). Лише невелику частину біомаси господарі приватних домоволодінь і дачних ділянок використовують для перегною і для добрива, а головна частина – неконтрольовано гниє або самозаймається.

На нашу думку, використання технології біовугілля, зокрема біочару, зможе суттєво покращити ситуацію. Коротко кажучи, сутність технологій біовугілля й біочару зображено на рис 2. З опалого листя, сухих або гниючих гілок, органічних відходів можна отримати: біовугілля як екологічне паливо; біочар як органічне добриво для ґрунту.

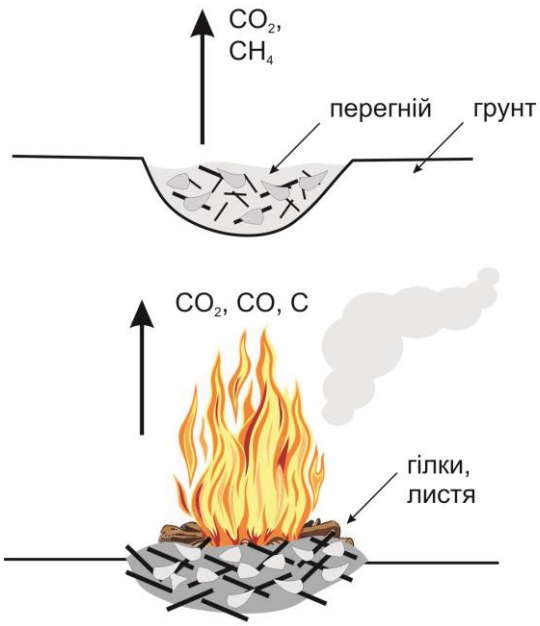


Рис. 1. Деякі джерела парникових газів

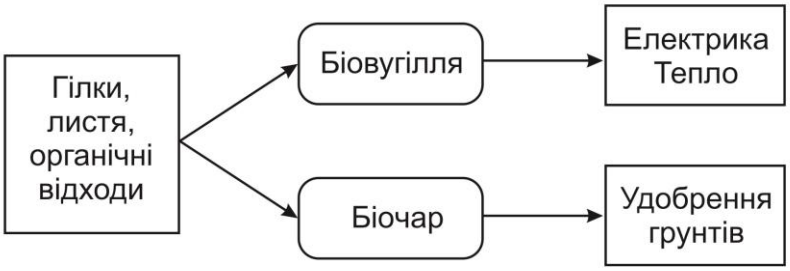


Рис. 2. Використання біовугілля та біочару

Як відомо, біовугілля отримують з органичного матеріалу шляхом піролізу, тобто торефікації. Сутність піролізу в тому, що біомасу нагрівають у середовищі з обмеженим вмістом кисню. Залежно від умов піролізу (температура, вологість середовища, тиск) і характеристик біоматеріалу можливо отримати біовугілля (biocoal), як замінник викопного вугілля, як паливо; або отримати біочар (biochar) як добріво для ґрунтів. Процес піролізу з використанням водяної пари й каталізаторів іноді називають гідротермальною карбонізацією (hydrothermal carbonization) біомаси. А продукт, що отримують, називають гідровугіллям (hydrocoal) [4, 5]. Біовугілля відносять до поновлюваних ресурсів, оскільки його отримують здебільшого з рослинної біомаси. Вуглець, якій міститься в біовугіллі, після спалювання знову повертається в біомасу рослин. Крім того, біовугілля не містить сірки, окислів азоту, ртуті, на відміну від викопного вугілля. Теплоутворювальна здатність біовугілля така сама, як у викопного кам'яного вугілля, а зольність значно менше [6].

Очевидно, штучний процес гідротермальної карбонізації дає нам підказку щодо походження викопного так званого гідротермального вугілля. Гідротермальне вугілля утворює жили й прожилки в тріщинах гірської породи (рис. 3), а його характеристики аналогічні характеристикам сусідніх вугільних пластів викопного вугілля [7]. Також процес гідротермальної карбонізації та зразки викопного гідротермального вугілля свідчать на користь гіпотези механізму утворення викопного вугілля, яку розвиває В. В. Соболєв зі співавторами [8]. Сутність гіпотези в тому, що викопне вугілля не є прямим продуктом трансформації рослинной біомаси, що відбувається під дією температури й тиску. Генезис викопного вугілля відбувається шляхом фізико-хімічної взаємодії флюїдів, які містять вуглець (CO, CO2, CH4 тощо), та рослинної біомаси, за участю іонів металів-каталізаторів, в умовах теплових та електричних полів земної кори [8].

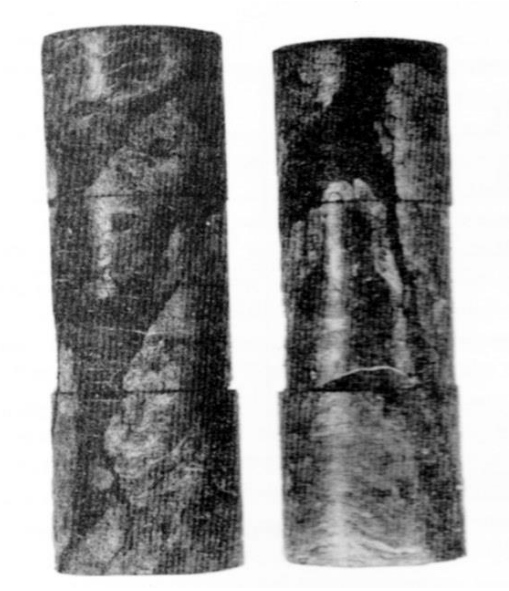


Рис. 3. Гідротермальне вугілля, згідно з [7]

Щодо проблеми використання біовугілля, то тут Україні бажано розвивати технології отримання біовугілля, а також проводити заходи щодо збору рослинної біомаси на територіях, про які сказано вище (міські парки, міські зелені насадження, посадки вздовж доріг, приміські зони, приватні домоволодіння, дачні ділянки). Технології біовугілля не є дешевими, але якщо йдеться про виживання людства, то такі технології того варти.

Автори планують продовжити дослідження з технологій біовугілля у напрямі їх здешевлення.

ПОСИЛАННЯ

1. Earth is ‘off-track’ to limit global warming to 1.5°C, scientists warn - as satellites show a ‘very large rise’ in CO_2 across the globe (17 January 2025). URL: https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-14292147/Earth-global-warming-large-rise-CO2.html (дата звернення: 28.02.2025).
2. Terrifying study predicts exactly how many people will DIE from climate change by 2100 (21 November 2024). URL: https://www.dailymail.co.uk/sciencetech/article-14109363/Terrifying-study-predicts-people-DIE-climate-change.html (дата звернення: 28.02.2025).
3. Brutal Heat Impacting Olympics ‘Virtually Impossible’ Without Climate Change (01 August 2024). URL: https://www.sciencealert.com/brutal-heat-impacting-olympics-virtually-impossible-without-climate-change (дата звернення: 28.02.2025).
4. Biocoal. URL: https://bioenergyeurope.org/glossary/biocoal/ (дата звернення: 28.02.2025).
5. Что такое биоуголь или гидротермальная карбонизация биомассы? (27.05.2018). URL: http://www.biowatt.com.ua/informatsiya/chto-takoe-biougol-ili-gidrotermalnaya-karbonizatsiya-biomassy/ (дата звернення: 28.02.2025).
6. Carrie Carlson, Alex Ebben. Biocoal from biomass: an emerging opportunity for renewable energy. URL: http://feeco.com/biocoal-biomass-emerging-opportunity-renewable-energy/ (дата звернення: 28.02.2025).
7. Голицын М. В. Мир солнечного камня: сегодня и завтра ископаемого угля/ М. В. Голицын, А. М. Голицын. М., 2010. С. 31–33, 204.
8. Система уголь-газ в углеводородах угольного генезиса/ В. В. Соболев, А. С. Поляшов, В. В. Зберовский, А. А. Ангеловский, И. Ф. Чугунков. Днепропетровск, 2013. 248 с.

УДК 574:911.2

КЛІМАТИЧНІ ЗМІНИ ТА ЇХ ВИВЧЕННЯ У ВИЩІЙ ШКОЛІ: МЕТОДИЧНІ АСПЕКТИ

В. В. Іванців[1], В. В. Федонюк[1], М. А. Федонюк[1]

[1]Луцький національний технічний університет
вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018, Україна,
тел.: (050)760-98-51, e-mail: ecolutsk@gmail.com

Проаналізовано актуальність, особливості методики викладання та інструменти й методи інформаційно-комунікаційних технологій, які можуть застосовуватися в процесі розробки курсів з адаптації до змін клімату у вищих навчальних закладах. Обґрунтовано важливість впровадження таких навчальних курсів для майбутніх фахівців технічних спеціальностей у вищій школі. Узагальнено досвід розробки та викладання курсів з адаптації до кліматичних змін у Луцькому національному технічному університеті. Описано перспективні до застосування на практичних і лабораторних заняттях методи інформаційно-комунікаційних технологій, що можуть бути застосовані як інструмент ознайомлення здобувачів з сучасними аспектами кліматичних змін та методами адаптації до них у галузях господарської діяльності людини.

Ключові слова: *зміни клімату, адаптація, освітня діяльність, інформаційно-комунікаційні технології.*

CLIMATE CHANGE AND ITS STUDY IN HIGHER EDUCATION: METHODOLOGICAL ASPECTS

V. Ivantsiv[1], V. Fedonyuk[1], M. Fedonyuk[1]

[1]Lutsk National Technical University,
St. Lvivska, 75, Lutsk, 43018, Ukraine,
phone: (050)760-98-51, e-mail: ecolutsk@gmail.com

The relevance, features of teaching methods and tools and methods of information and communication technologies that can be used in the process of developing courses on adaptation to climate change in higher educational institutions are analyzed. The importance of implementing such training courses for future specialists in technical specialties in higher education is substantiated. The experience of developing and teaching courses on adaptation to climate change at Lutsk National Technical University is summarized. The promising methods of information and communication technologies for application in practical and laboratory classes are described, which can be used as a tool for familiarizing applicants with modern aspects of climate change and methods of adapting to them in the fields of human economic activity.

Key words: *climate change, adaptation, educational activities, information and communication technologies.*

ORCID: [1]0000-0003-4710-3245; [1]0000-0002-1880-6710; [2]0000-0002-4034-3695

У сучасному світі глобальні зміни клімату є однією з гострих екологічних проблем, вони торкнулися всіх галузей виробничої та господарської діяльності людини, безпосередньо впливають на повсякденне побутове життя та нарощують свої прояви і вплив у перспективних проєкціях при моделюванні розвитку соціуму.

Тому у вищих навчальних закладах України стає актуальною розробка та впровадження в освітній процес навчальних курсів (дисциплін) з адаптації до змін клімату. Для Волинської області, в якій основними економікоформуючими галузями господарської діяльності є агробізнес, лісове господарство, туристичний бізнес, підготовка фахівців в університетах, обізнаних з впровадженням заходів з адаптації до змін клімату, є важливим й нагальним завданням, оскільки регіональні прояви кліматичних змін в області є досить помітними. Як зазначено у дослідженнях Мерленка І. М., Федонюк В. В., Мерленко Н. О., Федонюка М. А., Линюка Р. В., Ковальчук Н. С. [1, 6], такі зміни суттєво впливають на агровиробництво в регіоні, формуючи повістку зміни домінуючих агрокультур та агротехнічних методів і практик. У роботі Федонюк В. В., Картавої О. Ф., Іванціва В. В. [4] було розглянуто вплив кліматичних змін на особливості організації туристично-рекреаційної діяльності в регіоні. Проявляються такі зміни і в сфері лісогосподарської діяльності, організації функціонування природно-заповідних територій, про що зазначали Мирка В. В., Федонюк В. В., Іванців В. В., Федонюк М.А. [2], це ще раз підкреслює важливість їх вивчення здобувачами.

Метою цього дослідження був аналіз особливостей розробки, впровадження та викладання курсів з адаптації до змін клімату у вищих навчальних закладах технічного спрямування.

Об’єктом дослідження були навчальні курси з адаптації до змін клімату, та їх практичне наповнення. Предмет дослідження – форми та методи викладання питань щодо адаптації до змін клімату у вищій школі, які ґрунтуються на використанні інформаційно-комунікаційних технологій. В роботі використовувалися такі методи дослідження: аналітичний, порівняльно-оцінковий, картографічний, описовий, статистично-математичний, графічний.

Матеріали дослідження: власні напрацювання авторів у галузі розробки, впровадження та вдосконалення дисциплін професійного й загального спрямування у сфері вивчення адаптаційних механізмів та методів пристосування до змін клімату. Для теоретичної оцінки та аналізу стану проблеми було проаналізовано дослідження [1–8].

Практичне значення: результати дослідження можуть бути імплементовані в практику освітньої діяльності у вищих навчальних закладах України, в еколого-просвітницькій діяльності та в інших галузях.

Одержані результати: проаналізовано й узагальнено досвід авторів у сфері розробки і впровадження в освітній процес технічного університету курсів з адаптації до змін клімату, який дозволяє сформулювати низку рекомендацій та методичних підходів щодо структури, наповнення таких курсів і застосування інформаційно-комунікаційних технологій при їх викладанні. Так, у дослідженні Федонюк В. В., Іванціва В. В., Федонюка М. А., Панькевича С. Г. [3] було проведено аналіз застосування методів ІКТ у навчальних курсах, що стосуються вивчення заповідної справи, дослідження лісових екосистем та природоохоронних територій, а в праці Федонюка М. А. та Федонюк В. В. [5] детально розглядалися питання використання деяких інструментів ІКТ під час вивчення питань у сфері аграрних наук та агробізнесу. Оскільки навчальні курси у сфері адаптації до змін клімату поки не є повсюдно апробованими у вищій школі, то сформулюємо напрацьовані рекомендацій щодо використання методів ІКТ при їх розробці та практичному викладанні й наповненні курсів.

1) Більшість навчальних дисциплін з адаптації до змін клімату доцільно викладати із залученням численних інструментаріїв та ресурсів, які розроблені на цей час та доступ до яких переважно безкоштовний, наприклад ресурсів Google Earth, EO-Browser, EOS DATA ANALITICS [3, 5] та багатьох інших;
2) Водночас навчальні питання, що торкаються інструментального контролю та аналізу параметрів атмосфери, можуть бути проілюстровані ютуб-роликами, навчальними відеозастосунками як наявними у мережі, так і розробленими викладачем; це полегшить організацію освітнього процесу під час переходу до дистанційної форми навчання;
3) Вагомою складовою підготовки фахівців зі змін клімату є робота з електронними метеорологічними архівами, серед яких виділимо ресурси Метеопост, ПогодаКлімат, Метеоблю (https://meteopost.com/; https://www.meteoblue.com/) та інші подібні адаптаційні архіви чи моделі метеорологічних трендів;
4) Ефективним методом підвищення якості навчання, формування у здобувачів як «м’яких» навичок, так і професійних умінь, є проєктна діяльність, зокрема розробка групових STEM–проєктів, які часто є базою підготовки й становлення фахівця в галузі.

ПОСИЛАННЯ

1. Мерленко І. М., Федонюк В. В., Мерленко Н. О. Адаптація до сучасних кліматичних змін агрономічних технологій в Північно-Західному Поліссі. Вплив кліматичних змін на просторовий розвиток територій Землі: наслідки та шляхи вирішення. Збірник наукових праць IV Міжнародної науково-практичної конференції. Херсон, 10-11 червня 2021 року. Херсон: ДВНЗ «ХДАУ», 2021. С. 228–230.
2. Мирка В. В., Федонюк В .В., Іванців В. В., Федонюк М. А. Порівняння динаміки мікрокліматичних показників на території Черемського природного заповідника у XX та XXI ст. Екологічні науки: науково-практичний журнал. К.: Видавничий дім «Гельветика», 2022. № 7(40). С. 120–125. UPL: http://ecoj.dea.kiev.ua/archives/2022/1/22.pdf
3. Федонюк В. В., Іванців В. В., Федонюк М. А., Панькевич С. Г. Приклади використання інтернет-ресурсів у практичному курсі дисципліни «Заповідна справа». Інформаційні технології і засоби навчання. К., 2015. № 2 (46). С. 109–123. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ITZN_2015_46_2_13
4. Федонюк В. В., Картава О. Ф., Іванців В. В. Економічне оцінювання рекреаційно-туристичного потенціалу регіональних ландшафтних парків України. Актуальні проблеми економіки. К.: ТОВ «Наш формат», 2016. № 1 (175). С. 209–216. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ape_2016_1_25
5. Федонюк М. А., Федонюк В. В. Використання інструментів EOS DATA ANALITICS для моніторингу сільськогосподарських земель. Сільськогосподарські машини. Луцьк: ЛНТУ, 2019. Вип. 42. С. 96–104. URL: http://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal32/article/view/182
6. Федонюк В. В., Мерленко І. М., Федонюк М. А., Линюк Р. В., Ковальчук Н. С. Зміни агрокліматичних чинників в зоні Полісся в контексті глобального потепління (на прикладі Волинської області). Вісник Національного університету водного господарства та природокористування. Збірник наукових праць. Сільськогосподарські науки. Рівне, 2019. № 2(86). С. 124–134. URL: http://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/agri/article/view/781

УДК 620.9:378

ОБҐРУНТУВАННЯ ПОТРЕБИ ТА ШЛЯХИ ПОБУДОВИ СИСТЕМИ НАДАННЯ ОСВІТНІХ ПОСЛУГ ДЛЯ ВОДНЕВОЇ ІНДУСТРІЇ УКРАЇНИ

Н.-А. Ю. Сорока[1], М. О. Карпаш[2], Л. Я. Жовтуля[3], М. М. Косьмій[4]

Університет Короля Данила,
вул. Є. Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна,
тел.: (095) 207-32-27, e-mail: nazarii.soroka@ukd.edu.ua

При вирішенні поставлених у роботі завдань використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення поточного стану водневої освіти в Україні, міжнародного досвіду та даних опитування стейкхолдерів водневої індустрії щодо вимог до навичок та освітніх потреб.

Ключові слова: *воднева промисловість, освітні послуги, водневі технології, дефіцит навичок, професійна підготовка, відновлювана енергетика, професійно-технічна освіта, вища освіта, воднева безпека, водневий ланцюжок створення вартості.*

JUSTIFICATION OF THE NEED AND WAYS TO BUILD A SYSTEM OF EDUCATIONAL SERVICES FOR THE HYDROGEN INDUSTRY OF UKRAINE

N.-A. Soroka[1], M. Karpash[2], L. Zhovtulia[3], M. Kosmii[4]

King Danylo University,
35 Yevgena Konovaltsa str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018
phone: (095) 207-32-27, e-mail: nazarii.soroka@ukd.edu.ua

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used based on the study of the current state of hydrogen education in Ukraine, international experience, and survey data from stakeholders in the hydrogen industry regarding skills requirements and educational needs.

Key words: *hydrogen industry, educational services, hydrogen technologies, skills gap, professional training, renewable energy, vocational education, higher education, hydrogen safety, hydrogen value chain.*

ORCID: [1]0000-0002-8549-7014; [2]0000-0002-4223-3828; [3]0000-0001-5255-8522; [4]0000-0003-4823-5573.

Для становлення водневої енергетики критично важливе значення у середньо- та довгостроковій перспективі становить підготовка кваліфікованих кадрів для забезпечення всіх етапів створення доданої вартості водню. Згідно з даними Європейської стратегії водневих навичок [1], близько 200 професій задіяні у створенні доданої вартості водню. Загалом мають великий попит інженерні та технологічні позиції, проте проєктні менеджери, архітектори, фахівці у сфері нормативної документації, працівники відділу продажів, маркетингу також необхідні.

В Україні воднева економіка перебуває на зародковому етапі, з наявними проєктами водневої стратегії та дорожньої карти. Також в межах окремих дослідних інститутів, університетів проводяться дослідження водневих технологій та розробляються водневі проєкти. Університет Короля Данила залучений до робочої групи двох водневих долин – у Люксембурзі та Ірландії, а також до освітнього проєкту стосовно фахової передвищої освіти H2CoVE. У межах цих проєктів, команда УКД провела опитування організацій щодо рівня впровадження водневих технологій, освіти та необхідних навичок і планує розробити та ввести в освітній процес відповідні дисципліни. Опитування охопило освітні заклади, підприємства, а також державні установи, і було отримано 21 відповідь.

95 % респондентів відповіли, що відчувають / передбачають дефіцит кваліфікованих кадрів для розбудови водневих технологій і виділили компетенції, які є важливими у роботі з водневими технологіями на їхньому підприємстві. 20,27 % усіх відповідей припадає на дослідження та розробки; 17,57 % – на безпеку та відповідність нормативним вимогам; по 14,86 % – на технології виробництва водню, зберігання та поводження з воднем, системний дизайн та інжиніринг, а 13,51 % відповідей припадає на логістику транспортування водню.

Було виділено сфери, пріоритетні для навчання: загальна хімія та хімічні технології, промислова безпека та поводження з воднем, системний дизайн та інжиніринг, виробництво водню за допомогою інтеграції з відновлюваними джерелами енергії, зберігання, транспортування та використання водню. Щодо кваліфікації, то 42,9 % респондентів

очікують, що майбутні фахівці матимуть кваліфікацію магістра, 33,3 % – що кваліфікацію бакалавра і 23,8 % очікують наявність професійно-технічної освіти.

Також командою було проведено невелике дослідження наявних в Україні освітніх курсів та дисциплін. У НУБіП в 2023 році на базі ОП «Теплоенергетика» було введено вибіркову дисципліну «Воднева енергетика» для бакалаврського рівня. Ця дисципліна охоплює здебільшого різні способи генерації водню, оцінку впливу цих методів генерації на навколишнє середовище, а також комбіновані з акумуляторами методи зберігання енергії водню [2]. Державний університет «Житомирська політехніка» розпочав у 2023 році співпрацю з Українською водневою радою, що дозволило створити водневу лабораторію в межах наукового парку університету. Це дозволило, зокрема, ввести в освітній процес 4 дисципліни («Інноваційний менеджмент технологій та конструкцій автомобілів, ресурсозбереження та оцінка ризиків», «Ресурсозберігаючі технології на автомобільному транспорті», «Управління транспортними потоками в центрі міст» та «Транспортне планування великих міст»), інформацію про паливні елементи та водневі автомобілі. Також вивчення водневих технологій було введено в курс «Відновлювана енергетика», а також було впроваджено вибіркову дисципліну «Воднева енергетика та паливні елементи» [3]. Ця вибіркова дисципліна фокусується на методах виробництва водню, застосуванні різних типів паливних елементів, а також охоплює питання зберігання й транспортування водню [4].

Харківський політехнічний інститут впровадив вибіркову дисципліну «Воднева енергетика» для кваліфікаційного рівня магістр. Дисципліна фокусується на термодинамічних і теплофізичних основах генерації водню та його експлуатації в енергетичних та технологічних процесах. Також дисципліна охоплює питання зберігання водню у газоподібному, зрідженому та хімічно зв'язаному вигляді [5]. Для магістерського рівня освіти у КНУ ім. Тараса Шевченка тему водневої енергетики було введено в обов'язкову дисципліну «Відновлювальні джерела енергії» ОП «Високі технології (Біотехнологія)». Ця дисципліна охоплює методи отримання водню, застосування паливних елементів та твердотільних накопичувачів водню [6]. Також наявні сертифікатні програми для магістерського рівня у КПІ ім. Ігоря Сікорського «Інжиніринг та автоматизація водневих енергетичних систем і технологій» та «Інжиніринг та автоматизація паливно-енергетичних систем і біоенергетичних технологій». Перша сертифікатна програма охоплює 5 освітніх компонентів, які стосуються виробництва та зберігання водню, моделювання електрохімічних процесів та теплових процесів при виробництві водню, та застосування цього палива у транспортних технологіях [7]. Друга сертифікатна програма охоплює, зокрема, технічне врегулювання, стандартизацію та сертифікацію водню як палива, його фізико-хімічні, експлуатаційні та екологічні властивості.

Аналіз демонструє, що наявні освітні компоненти охоплюють питання генерації, зберігання та споживання водню в транспортному секторі, однак ключові запити щодо безпечної експлуатації та транспортування водню залишаються не представленими в освіті. Також не було знайдено введених освітніх компонентів, пов'язаних з водневою енергетикою, у закладах фахової передвищої освіти та повноцінних освітніх програм у вищих навчальних закладах.

ПОСИЛАННЯ

1. European Hydrogen Skills Strategy. URL: https://cutt.ly/4rtIhQUK (дата звернення 03.03.2025).
2. Робоча програма навчальної дисципліни «Воднева енергетика»: Національний університет біоресрсів і природокристування України; Додаток 2 до наказу від 23.04.2023. (№ 244). 13 с. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u240/rp_29.pdf (дата звернення 03.03.2025).
3. Воднева освіта: поточні результати співпраці Української водневої ради та Житомирської політехніки: вебсайт. URL: https://cutt.ly/HrtIbcaS (дата звернення: 03.03.2025).
4. Каталог вибіркових навчальних дисциплін; Воднева енергетика та паливні елементи: вебсайт. URL: https://ztu.edu.ua/site/catalog?new_id=51 (дата звернення: 03.03.2025).
5. Силабус освітнього компонента – Програма навчальної дисципліни: Воднева енергетика. URL: https://cutt.ly/ortIWw6e (дата звернення 03.03.2025).
6. Робоча програма навчальної дисципліни «Відновлювальні джерела енергії»: Київський національний університет імені Тараса Шевченка; 22 березня 2021 р. Протокол № 9 URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u240/rp_29.pdf (дата звернення 03.03.2025).
7. Сертифікатні програми. Сертифікатна програма «Інженерне проєктування електротехнічних та мехатронних систем»: вебсайт. URL: https://cutt.ly/NrtIGqCC (дата звернення: 03.03.2025).

УДК 378:620.9

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ БАКАЛАВРСЬКОЇ ОСВІТНЬОЇ ПРОГРАМИ У СФЕРІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

В. С. Цих[1], А. В. Яворський[1], М. О. Карпаш[2]

[1]Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна,
тел.: (097) 855-40-91, e-mail: vitalii.tsykh@nung.edu.ua
[2]Університет Короля Данила
вул. Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна
тел.: (067) 342-01-28, e-mail: maksym.karpash@ukd.edu.ua

У роботі представлено особливості реалізації освітньої програми у сфері відновлюваних джерел енергії, яка передусім основана на якісній практичній підготовці здобувачів освіти на базі сучасного матеріально-технічного забезпечення.

Ключові слова: *освітня програма, навчання, відновлювані джерела енергії, інформаційно-вимірювальні технології, практична підготовка.*

FEATURES OF THE IMPLEMENTATION OF THE BACHELOR'S DEGREE PROGRAM IN RENEWABLE ENERGY

V. Tsykh[1], A. Yavorskyi[1], M. Karpash[2]

[1]Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019
phone: (097) 855-40-91, e-mail: vitalii.tsykh@nung.edu.ua
[2]King Danylo University
35 konovaltsa str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018
phone: (067) 342-01-28, e-mail: maksym.karpash@ukd.edu.ua

The paper presents the peculiarities of implementing an educational program in the field of renewable energy sources, which is primarily based on high-quality practical training of students on the basis of modern material and technical support.

Key words: *educational program, training, renewable energy sources, information and measurement technologies, practical training.*

ORCID: [1]0000-0002-9095-4099; [2]0000-0002-5970-4286; [3]0000-0002-4223-3828

На цей час відновлювані джерела енергії дедалі більше поширюються у світі, зокрема й у нашій країні. Використання таких джерел є надзвичайно важливим в контексті енергетичної безпеки та зменшення впливу на навколишнє середовище в межах досягнення глобальних цілей сталого розвитку. Тому серйозним завданням сьогодення є підготовка висококваліфікованих фахівців за цим напрямом, які б могли фахово займатись питаннями проєктування, монтажу та експлуатації відновлюваних джерел енергії.

В Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу (ІФНТУНГ) з 2020 року реалізовується освітня програма (ОП) бакалаврського рівня «Інженерія відновлюваної енергетики», мета якої полягає саме у підготовці фахівців за цим напрямом з акцентом на використанні спеціалізованих інформаційно-вимірювальних систем і технологій у сфері відновлюваної енергетики [1]. Основною особливістю навчання здобувачів за цією освітньою програмою є те, що воно проводиться відповідно до принципів найкращих інженерно-технологічних університетів Європи, коли практичне навчання становить понад 60 % обсягу навчального курсу, а отримання практичних навичок безпосередньо базується на використанні сучасної матеріально-технічної бази. До лабораторно-навчального комплеку, який забезпечує навчання за ОП, належать навчальні лабораторії «Фізичних основ відновлюваних джерел енергії», «Відновлюваної енергетики», «Дослідження енергетичних характеристик альтернативних палив», «Інформаційних технологій та комп'ютерного моделювання в енергетиці». Здобувачі в процесі навчання можуть використовувати для проведення практичних та лабораторних занять декілька мережевих та автономних фотоелектричних станцій, теплову помпу, професійну метеостанцію, навчальні комплекси з вивчення основ геліотермальної та гідроенергетики, біоенергетики та енергетики майбутнього – водневої. Також в лабораторіях розміщені повнорозмірні стенди, що відтворюють роботу реальних енергетичних установок.

Зокрема, демонстрація основ відновлюваної енергетики під час навчання здійснюється за допомогою навчальних наборів компанії LexSolar (Німеччина). Ці навчальні набори використовуються для демонстрацій основних принципів побудови малих гідроелектростанцій, генерування, зберігання й використання зеленого водню, перетворення сонячної енергії на теплову за допомогою геліоколекторного обладнання й перетворення біомаси на енергію, зокрема генерації біогазу, принципів сонячної та вітроенергетики й використання джерел відновлюваної енергетики в сучасних «розумних» електромережах для оптимальної передачі енергії й зменшення використання викопного палива. Всі набори виконані в модульному компонуванні, що дозволяє об'єднувати елементи декількох навчальних наборів у різноманітні моделі систем електропостачання з елементами відновлюваних джерел енергії. Фото навчальних занять наведені на рис. 1.

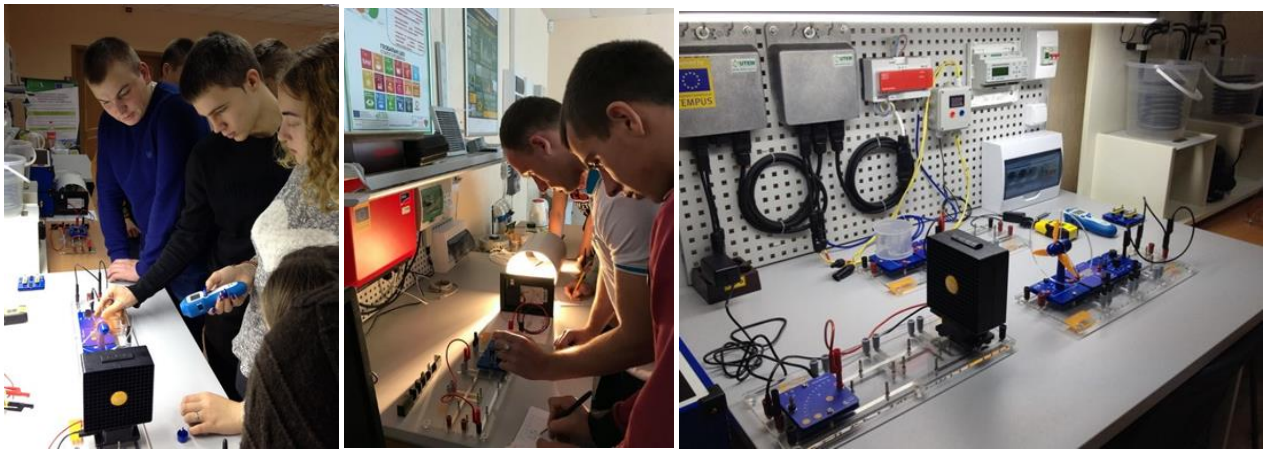


Рис. 1. Проведення лабораторних робіт з відновлюваної енергетики

Природно, що в процесі навчання особлива увага зосереджена на питанні сонячної енергетики, як найбільшого сегменту використання відновлюваних джерел енергії. Відповідно до цього детально опрацьовуються студентами спеціалізовані програмні пакети, спрямовані на моделювання та проєктування енергосистем, як-от PVsyst, HOMER pro, Polysun.

Додатковою особливістю навчання за ОП є проходження літньої виробничої практики на базі навчально-виробничої лабораторії монтажу, налаштування та експлуатації фотоелектричних станцій. Як було зазначено, надзвичайно важливим у процесі підготовки інженерних кадрів є отримання ґрунтовних практичних навичок, зокрема набуття робочої професії. Підхід, який практикується в кращих технологічних університетах ЄС полягає в тому, що майбутній інженер повинен вміти і знати все те, що й робітник за відповідним напрямом. Отже, такий підхід значно підвищує якість підготовки майбутнього інженера і робить його значно конкурентно привабливішим на ринку праці. Навчання та набуття практичних навичок для студентів проходить на найкращому обладнанні, це – мережеві фотоелектричні інвертори FRONIUS (Австрія), комплекти для побудови автономних фотоелектричних станцій Victron Energy (Нідерланди), системи кріплення фотоелектричних модулів Kripter (Україна), обладнання захисту ФЕС ETI (Словенія) тощо. Додатково використовується спеціалізований інформаційно-вимірювальний комплекс Seward PV150 (Великобританія), який дозволяє проводити весь комплекс вимірювань і контролю для фотоелектричних станцій відповідно до міжнародних стандартів. Під час проходження виробничої практики студенти зможуть набути навички робочої професії «Майстер з монтажу та обслуговування систем відновлювальної енергетики (фотоелектричні станції)», що включає виконання робіт з механічного монтажу опорних конструкцій та обладнання ФЕС, електричного монтажу обладнання, контролю та вимірювання всіх необхідних параметрів ФЕС, що впливають на працездатність, продуктивність та безпеку роботи станції, а також виконання робіт з налаштування ФЕС, засобів комерційного / технологічного обліку, контролю метеопараметрів і систем віддаленого моніторингу.

Якісна практична підготовка на базі сучасного обладнання дозволяє насамперед забезпечити високі результати навчання та сприяти подальшому працевлаштуванню здобувачів освіти за вибраним напрямом.

ПОСИЛАННЯ

1. Освітня програма «Інженерія відновлюваної енергетики», рівень бакалавр. URL: https://nung.edu.ua/department/kafedra-informatsiyno-vymiryuvalnykh-tekhnolohiy/osvitnya-prohrama-inzheneriya (дата звернення: 14.03.2025).

УДК 621.311.25

ЦИФРОВІЗАЦІЯ ОСВІТНЬОГО ПРОЦЕСУ: СУЧАСНІ ТРЕНДИ ТА ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ

В. І. Данилишин[1], М. Р. Лопушанська[2, 3, 4], О. Б. Роїк[1]

[1]ВСП «Техніко-економічний фаховий коледж НУ «Львівська політехніка», 79000, Львів, Львівська область, вул. Пасічна, 87

[2]Товариство з обмеженою відповідальністю «ЕКО-ОПТІМА», 82000, Старосамбірський р-н, Львівська обл., м. Старий Самбір, вул. Лева Галицького, 96а
mariialopushanska@gmail.com

[3]Асоціація професіоналів довкілля «PAEW», 03087, Київ-87 а/с 25

[4]ГО «Жіночий енергетичний клуб України» (WECU), 02000, м. Київ, вул. Воздвиженська, 14, корп. 2

У сучасному світі якість освіти стає фактором, від якого залежить, чи зможе кожна людина знайти й реалізувати себе в дорослому житті, до якого її мають підготувати навчальні заклади. Тому для освіти загалом і для кожного педагога зокрема важливо визначити тенденції розвитку освіти з метою побудови освітнього простору, в якому надаються освітні послуги, що враховують індивідуальні потреби здобувачів освіти та потреби сучасного суспільства. Діджиталізація освіти та освітніх процесів – це сучасний етап інформатизації, наповнення освітнього середовища цифровими та електронними засобами, пристроями, системами та програмним забезпеченням.

Ключові слова: *освітній процес, цифровізація освіти, навчання, інтерактивні методи, здобувачі освіти, педагог, освітнє середовище.*

DIGITALIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS: CURRENT TRENDS AND A LOOK INTO THE FUTURE

V. Danylyshyn[1], M. Lopushanska[2,3,4], O. Roik[1]

[1]Technical and Economic College of Lviv Polytechnic National University, 87 Pasichna Street, Lviv, Lviv region, 79000

[2]ECO-OPTIMA Limited Liability Company,
96a, Lev Halytsky Street, Staryi Sambir, Lviv region, 82000, Staryi Sambir district, Lviv region
e-mail: mariialopushanska@gmail.com

[3]Professional Association Of Environmentalists Of The World (PAEW), 03087, Kyiv-87, PO Box 25

[4] NGO 'Women's Energy Club of Ukraine' (WECU) 02000, Kyiv, 14 Vozdvyzhenska str.

In the modern world, the quality of education is becoming a factor that determines whether each person will be able to find and realize themselves in adult life, for which educational institutions should prepare them. Therefore, for education in general and for each teacher in particular, it is important to identify trends in the development of education in order to build an educational space in which educational services are provided that take into account the individual needs of education seekers and the needs of modern society. Digitalization of education and educational processes is a modern stage of informatization, filling the educational environment with digital and electronic means, devices, systems and software.

Key words: *educational process, digitalization of education, learning, interactive methods, students, teacher, educational environment.*

ORCID: [1] 0009-0006-7193-0610, [2] 0000-0002-0557-1609

«Якість освітньої системи не може бути кращою, ніж якість вчителів у цій системі», вважав Андреас Шляйхер, німецький математик, науковець і дослідник у галузі освіти. Можливо не всі згідні з таким твердженням, але на сьогодні, щоб бути цікавими для сучасної молоді, педагоги повинні йти в ногу з інноваційними технологіями навчання. Лекцію без візуалізації, конспекти, ксерокопії теперішні здобувачі освіти сприймати не хочуть. Так, нам складно і страшно завжди сприймати щось нове, через так звану тимчасову некомпетентність в тому чи іншому питанні. Останнім часом спостерігається така тенденція, що трендом в освіті стає її цифровізація. Вона триває вже не один рік, але з дистанційним навчанням вона набула шалених обертів. На сьогодні здійснюється значна кількість освітніх

заходів, спрямованих на формування цифрових навичок, проте вони не мають системного характеру, забезпечують формування лише окремих навичок та не вирішують питань низького рівня володіння цифровими навичками в суспільстві та обізнаності щодо цифрових прав громадян [1].

Цифровізація освіти – це впровадження в освітній процес на всіх його рівнях сучасних інформаційно-комунікаційних технологій з метою розвитку в здобувачів освіти здатності аналізувати інформацію, критично мислити й максимально використовувати різноманітний мультимедійний контент та інтерактивні методи навчання в освітніх цілях (рис. 1).

Рис. 1. Цифровізація освіти

На сьогодні можна виділити декілька чинників, що вказують на необхідність у побудові та використанні цифрового освітнього середовища:

- цифрове покоління (нове покоління дітей, «покоління Z», «діти процесора», «діти-планшетники», «дітичіпи»);
- інноваційні інформаційні технології, що формують цифрове середовище;
- цифрова держава та нові вимоги до працюючого персоналу.

Цифрова освіта має низку переваг порівняно з традиційною освітньою моделлю. Вона дає доступ до освітнього середовища ширшому колу здобувачів освіти, дозволяє багаторазово використовувати навчальний матеріал, що значно полегшує його засвоєння та дає змогу здобувачам освіти самостійно вибирати зручну для себе форму засвоєння матеріалу, забезпечуючи тим самим індивідуальність освітньої траєкторії. Слід відзначити, що цифрова компетентність є на сьогодні найбільшим поняттям серед низки понять, використаних у сфері інформаційно-комунікаційних (комп'ютерних, цифрових) технологій [2].

Поряд з цифровими навчальними матеріалами важливу роль у сучасному освітньому процесі мають відігравати цифрові освітні сервіси – як належно стандартизовані та апробовані засоби й інструменти організації навчання та використання в ньому сучасного мультимедійного контенту.

Таким чином, в сучасному світі якість освіти стає тим фактором, що дозволяє кожній людині знайти та реалізувати себе в дорослому житті, до якого має підготувати заклад освіти. Тому для освітнього процесу загалом і кожного педагога зокрема важливе розуміння сучасних трендів розвитку освіти задля формування освітнього простору, де освітні послуги надаватимуться з зрахуванням індивідуальних потреб здобувачів освіти та потреб суспільства, яке розбудовує сучасну Україну.

ПОСИЛАННЯ

1. Концепція розвитку цифрових компетентностей. ULR: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/167-2021-%D1%80#Text. MAJOR PROJECT ASSESSMENT: White Rock Wind Farm (MP10_0160)
2. Гаврілова Л. Г., Топольник Я. В. Цифрова культура, цифрова грамотність, цифрова компетентність як сучасні освітні феномени. Інформаційні технології і засоби навчання. 2017.

IMPROVEMENT OF METHODOLOGY FOR ORGANIZING STUDENTS' INDEPENDENT WORK IN THE COURSE OF "ALTERNATIVE ENERGY SOURCES"

M. Abdukahharova

Andijan State University
+998993153055, munojar0803@gmail.com

The paper provides recommendations for improving the methodology for organizing independent work of students studying at the "Alternative Energy Sources" department.

***Keywords**: alternative energy sources, independent work, goals and objectives, types, innovative methods.*

Improving the methodology for organizing independent work of students in the field of "Alternative Energy Sources" in higher educational institutions will help students deepen their knowledge, develop a creative approach, and improve practical skills. Improving such methodologies should include several important aspects:

1. Identifying educational goals and objectives.
- Objective: To develop students' ability to solve energy problems by studying alternative energy sources.
- Tasks: in-depth study of the issue; improving energy efficiency; developing innovative solutions.

2. Expanding the types of independent work.
- Coursework development: Conducting research by students on ways to solve specific problems;
- Practical projects: Students develop a project to solve real problems in their field;
- Quick Research: Conduct short-term research to test your knowledge.

3. Introduction of innovative teaching methods.
- Blended learning: Combining traditional classroom and online formats to create a comfortable environment for students to learn independently;
- Group-based learning: Dividing students into small groups and engaging them in problem-solving together;
- Project-based learning: Students participate in the learning process based on a specific project.

4. Organizational activities.
- Seminars and lectures: Participation in seminars held by local and international experts;
- Technological excursions: Taking trips to gain practical experience at energy source production sites.

5. Efficient use of resources and materials.
- Modern programs: Use of simulation programs and online resources;
- Interesting learning materials: Research articles, online English courses, and videos to watch.

6. Improving evaluation mechanisms
- Evaluation criteria: Using clear criteria when assessing the quality of independent work;
- Peer-review: Introducing a process of peer evaluation and feedback among students.

7. Taking into account students' opinions.
- Surveys: Collecting student feedback to further improve the learning process.
- Negotiations: Having an open discussion, understanding students' needs.

8. Engaging mentors.
- Collaboration with mentors: Using the mentoring system to get recommendations from teachers and experienced professionals.

9. Support to the learning process.
- Online platforms: Creating opportunities for communication and discussion with students on platforms such as Moodle, Google Classroom.

These proposals will help improve the methodology of organizing independent work of students studying in the "Alternative Energy Sources" direction, encourage openness to innovations, specialization and creative thinking. This process will increase students' self-development skills and prepare them for their future professional activities.

IMPROVING STUDENTS' INFORMATION AND COMMUNICATION COMPETENCES IN RENEWABLE ENERGY EDUCATION

S. Kakhramonova

Andijan State University

Abstract. This thesis provides recommendations for improving students' knowledge of renewable energy education and developing information and communication competence, as well as developing the skills to independently search, analyze, and present information by teaching them the correct use of modern information sources.

Keywords: competence, information and communication competence, renewable energy education.

Introduction. One of the generally accepted factors in the fight against ecological climate change and environmental degradation is the use of renewable energy sources [1]. It is difficult to imagine the development of renewable energy without renewable energy education. The role of education in the development of these methods of energy production, raising public awareness, and promoting them widely is important. Developing the information and communication skills of students in this field in higher education institutions is a very important issue, since this field is developing rapidly worldwide and requires the use of modern technologies to obtain information. The formation of information and communicative competence of a competency-based approach, incorporating some elements of systematic, personally oriented and synergistic approaches in pedagogical sciences, is one of the necessary foundations of the professional training of future specialists [2].

Methods. Competence is the presence of knowledge, experience and skills necessary for effective activity in a certain field, while competence is the ability to effectively apply the necessary knowledge, skills and experience in specific situations to achieve the goals of an individual or a team. Information and communicative competence is understood as the ability of a person to effectively and purposefully use information and communication technologies. The search for mechanisms for managing students' communicative competence is an important task in the development of higher education [3]. Information and communication competence is one of the key skills that students need to be successful in the modern world. It includes the ability to search, analyze, create and present information. It is also important to communicate effectively and collaborate through online platforms. This competence helps students expand their knowledge and achieve success in their professional careers.

The following teaching methods can be used to develop student competence in renewable energy education: interactive methods, use of information and communication technologies, STEM-based teaching, online platforms, and design methods.

Renewable energy education is developing in line with modern trends. They play an important role in improving the quality of education. Students should have an understanding of how to search official websites and databases, find the right sources, and be able to evaluate and analyze information when searching for information. Digital educational resources help make renewable energy education more effective and interesting. Online courses give students the opportunity to independently study various topics. Virtual laboratories allow for practical training in a safe and comfortable environment. Simulators are useful for modeling and analyzing renewable energy systems. When assessing students' information and communicative competence, it is important to monitor their correct use of ICT and analyze the usefulness of the information.

- Develop the ability to search for and critically analyze information
- Improve the ability to present information in various formats
- Improve teamwork and communication skills
- Develop the skills to conduct independent research and interpret results
- Increase the level of use of information and communication technologies

Conclusion. Information and communication competence is one of the key skills that students need to be successful in the modern world. It includes the ability to search, analyze, create and present information. In addition, it is important to communicate effectively and work collaboratively through online platforms. This competence will help students expand their knowledge and achieve success in their professional activities. This methodology will help students deepen their knowledge in the field of solar energy and develop information and communication skills. This is important for their future professional activities.

REFERENCES

1. Özbay, F., & Duyar, I. (2022b). Exploring the role of education on environmental quality and renewable energy: Do education levels really matter? Current Research in Environmental Sustainability, 4, 100185. https://doi.org/10.1016/j.crsust.2022.100185
2. Akeshova, M., Mukhamedzhanov, B., & Meirbekova, G. (2014). Formation of informational-communicative competence of future ecologists on the base of competence approach. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 116, 4322–4327. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.940
3. Lukyanova, N., Daneykin, Y., & Daneikina, N. (2015). Communicative Competence Management approaches in Higher education. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 214, 565–570. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.11.761

A COMPARATIVE ANALYSIS OF THE RENEWABLE ENERGY SOURCES EDUCATION IN THE BACHELOR'S PROGRAMS OF THE UNIVERSITY OF TURIN (ITALY) AND ANDIJAN STATE UNIVERSITY (UZBEKISTAN)

N. Abbosova

Andijan State University, Uzbekistan

Renewable energy sources (RES) play a crucial role in the global energy market today. Many universities around the world offer bachelor's degree programs in this field. Both the University of Turin and Andijan State University provide education in renewable energy, but their teaching methods, curricula, and resources differ significantly. This thesis analyzes the bachelor's programs in renewable energy education at these two universities.

Bachelor's Program in Renewable Energy at the University of Turin
The University of Turin offers a comprehensive undergraduate program focused on renewable energy sources. The structure of the curriculum is as follows:

Curriculum structure*:*
The bachelor's program at the University of Turin covers a wide range of courses related to renewable energy sources, divided into several categories:

Fundamental Courses*:* Physics, chemistry, mathematics, thermodynamics, and electrical energy systems.

Specialized Courses*:* Solar energy, wind energy, bioenergy, and geothermal energy.

Practical Training and Laboratories*:* The program includes courses, practical exercises, and laboratory work to provide hands-on experience.

Research and Innovation*:* The curriculum involves scientific research, the application of cutting-edge technologies, and real-world projects.

Teaching Methodology and Approaches:
The University of Turin uses interactive and hands-on teaching methods. Students work on projects, conduct simulations, and apply new technologies in practical settings. The program encourages scientific research and participation in international conferences to enhance students' knowledge and exposure to advanced technologies.

Collaboration and research*:*
The university is involved in international scientific collaborations and provides students with opportunities to work on cutting-edge research projects in renewable energy. Students also engage with various scientific centers globally.

Bachelor's Program in Renewable Energy at Andijan State University
Andijan State University has recently started developing a renewable energy bachelor's program. The curriculum includes the following:

Curriculum structure*:*
The bachelor's program at Andijan State University offers courses in renewable energy sources, but they are more limited compared to the University of Turin:

Core Courses: Physics, mathematics, electrical engineering, and fundamentals of energy.

Specialized Courses: Basic concepts of solar energy, wind energy, and bioenergy.

Practical Training*:* Although there are some laboratory exercises and practical work, these opportunities are fewer compared to the University of Turin.

Teaching methodology and approaches:
The teaching methods at Andijan State University are more traditional, relying primarily on lectures and seminars. While students acquire theoretical knowledge, there are fewer opportunities for hands-on experience. The application of modern technologies and innovative teaching methods is less emphasized than at the University of Turin.

Infrastructure and resources*:*
Andijan State University has some basic equipment for renewable energy studies, but there is a lack of dedicated laboratories and technical facilities. Scientific research and international collaborations are still in the developmental phase.

***Curriculum structure**:*
The University of Turin's renewable energy program is comprehensive and includes both theoretical and practical components, ensuring that students are well-prepared. Andijan State University's program, on the other hand, focuses more on basic concepts and has fewer practical opportunities.

***Teaching methodology and approaches**:*
Turin University employs interactive, hands-on teaching methods, which allow students to gain practical skills alongside theoretical knowledge. Andijan State University primarily uses traditional methods (lectures, seminars), which limits students' practical skills development.

Criteria	University of Turin	Andijan State University
Curriculum and Program Structure	Broad and specialized courses: Solar Energy, Wind Energy, Bioenergy, Geothermal Energy	Basic courses: Solar Energy, Wind Energy, Bioenergy, but fewer specialized courses
Practical Training	Yes, more practical exercises, simulations, and laboratory work	Some practical exercises available, but opportunities are limited
Research and Innovation	Advanced scientific research with new technologies and international collaborations	Scientific research and collaborations are still developing
Teaching Methodology	Interactive and hands-on methods (project-based work, simulations)	Traditional teaching methods (lectures, seminars)
Infrastructure and Laboratories	Well-developed laboratories and infrastructure for teaching new technologies	Limited infrastructure, no dedicated laboratories for renewable energy
Practical Experience for Students	Students have the opportunity to solve real-world problems and collaborate internationally	Fewer opportunities for hands-on experience due to limited infrastructure
External Collaborations	Collaboration with international scientific centers	External collaborations are still in the development phase

***Infrastructure**:*
The University of Turin has advanced laboratories and infrastructure for renewable energy, providing students with opportunities to gain real-world experience. In contrast, Andijan State University's infrastructure is limited, and students have fewer opportunities to gain hands-on experience.

***Research and innovation**:*
The University of Turin is a leader in research and international collaborations in the field of renewable energy, offering students the chance to work on cutting-edge projects. Andijan State University is still in the process of developing its research and international cooperation opportunities, which limits students' exposure to new technologies and innovations.

Conclusion
The University of Turin offers a well-rounded bachelor's program in renewable energy that combines both theoretical and practical education. The program emphasizes hands-on experience, scientific research, and international collaboration. Andijan State University's renewable energy program is still developing and has limited resources and practical training opportunities. However, Andijan State University has the potential to enhance its program by expanding resources, improving infrastructure, and fostering international collaborations to improve the quality of education in this field.

REFERENCES

1. Banos, R., Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Gil, C., Alcayde, A., & Gómez, J. (2011). Optimization methods applied to renewable and sustainable energy: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(4), 1753–1766.
2. Bergmann, S. A., & Luckeneder, S. (2020). Renewable Energy Education in European Higher Education Institutions. Journal of Cleaner Production, 268, 122089.
3. EU Commission (2022). Renewable Energy Education and Training: Best Practices and Lessons Learned. European Union Energy Policy Report.
4. Kalogirou, S. A. (2014). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. Academic Press.
5. University of Turin (2024). Bachelor's Degree in Environmental Engineering. Available at
6. Andijan State University (2024). Renewable Energy Education Programs. Available at

УДК 620.9:331.101.262

РОЛЬ ПРОФЕСІЙНИХ СТАНДАРТІВ У ФОРМУВАННІ ФАХОВИХ КОМПЕТЕНТНОСТЕЙ ЕНЕРГОМЕНЕДЖЕРІВ КОМПАНІЙ

О. В. Бориченко[1], А. В. Чернявський[2], К. А. Чернявський[3]

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
[1]тел.: (093) 116-89-44, e-mail: borichenko_olena@ukr.net
[2]тел.: (050) 981-39-08, e-mail: cherniavskyi.anatolii@lll.kpi.ua
[3]тел.: (066) 752-62-11, e-mail: kirill0667526211@gmail.com

У тезах розглянуто значення професійних стандартів як інструменту формування ключових компетентностей енергоменеджерів та їх вплив на освітню і практичну підготовку фахівців.

Ключові слова: *енергоефективність, енергоменеджмент, компетентності, підготовка фахівців, професійний стандарт, сертифікація, ISO 50001.*

THE ROLE OF PROFESSIONAL STANDARDS IN SHAPING THE PROFESSIONAL COMPETENCIES OF COMPANY ENERGY MANAGERS

O. Borychenko[1], A. Cherniavskyi[2], K. Cherniavskyi[3]

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteiskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
[1]phone: (093) 116-89-44, e-mail: borichenko_olena@ukr.net
[2]phone: (050) 981-39-08, e-mail: cherniavskyi.anatolii@lll.kpi.ua
[3]phone: (066) 752-62-11, e-mail: kirill0667526211@gmail.com

The paper examines the role of professional standards as a tool for shaping the core competencies of energy managers and their impact on the educational and practical training of specialists.

Key words: *certification, competencies, energy efficiency, energy management, professional standard, specialist training, ISO 50001.*

ORCID: [1]0000-0002-6127-2945; [2]0000-0003-2858-8224

В умовах загострення енергетичних викликів, спричинених глобальними процесами трансформації енергетики, зростанням цін на енергоносії, посиленням екологічного тиску та потребами дотримання міжнародних зобов'язань щодо клімату, актуальність впровадження ефективної системи енергоменеджменту в діяльність підприємств та організацій усіх форм власності набуває особливої ваги. Система енергоменеджменту виступає ключовим інструментом управління енергетичними ресурсами, який дозволяє підприємствам системно зменшувати енергоспоживання, скорочувати витрати на енергоресурси, знижувати викиди парникових газів та підвищувати загальну ефективність діяльності. Стаття 12 Закону України «Про енергетичну ефективність» [1] регулює діяльність з впровадження та функціонування систем енергоменеджменту в компаніях та організаціях. Системи енергетичного менеджменту впроваджуються відповідно до вимог національних стандартів України, гармонізованих з міжнародними стандартами [2].

Особливе значення енергоменеджмент набуває для компаній, що працюють в умовах високої енергоємності виробництва, постійного тиску з боку конкурентів, нестабільності цін на ресурси та необхідності дотримання норм екологічного законодавства. У таких умовах грамотне управління енерговитратами стає не лише інструментом підвищення економічної ефективності, але й важливим чинником корпоративної відповідальності та репутаційної стабільності. Однак ефективність будь-якої системи енергоменеджменту значною мірою залежить від рівня професійної підготовки персоналу, зокрема енергоменеджерів (професіоналів з енергетичного менеджменту). Саме ці фахівці відповідають за формування та реалізацію енергетичної політики компаній, аналіз енергоспоживання, планування та впровадження заходів з енергоефективності, проведення енергоаудитів, розробку звітності та моніторинг досягнення поставлених цілей [2]. У зв'язку з цим питання формування фахових компетентностей енергоменеджерів є надзвичайно важливим для сталого розвитку енергетичних систем підприємств.

Одним з ефективних інструментів забезпечення якості підготовки енергоменеджерів є запровадження професійних стандартів [3]. Професійний стандарт як нормативний документ встановлює перелік трудових функцій, трудових дій, а також відповідних їм знань, умінь та навичок, якими повинен володіти фахівець певного профілю. Запровадження таких стандартів дозволяє уніфікувати вимоги до професійної діяльності енергоменеджерів, сформувати цілісне уявлення про їхню роль та функції на підприємстві, забезпечити цільову підготовку кадрів в освітній системі, а також здійснювати незалежну оцінку кваліфікацій.

Згідно з європейською та українською практикою, основними функціями професійного стандарту в контексті формування фахових компетентностей енергоменеджерів є: формування вимог до професійної підготовки, оцінка професійної придатності та сертифікація фахівців, стандартизація підходів до енергоменеджменту, підвищення гнучкості системи безперервного навчання, а також інтеграція з міжнародними практиками.

Також слід зазначити, що раніше в Україні вже розроблені професійні стандарти «Енергетичний аудитор будівель», «Енергетичний аудитор процесів» та «Енергетичний аудитор транспорту». Ці стандарти вже стали базою для розроблення навчальних курсів, сертифікації фахівців та оновлення змісту освітніх програм, що підтверджує їх ефективність як інструменту формування компетентностей.

Зважаючи на викладене вище, в 2023 році наказом Ректора Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» було створено робочу групу з розроблення професійного стандарту «Професіонал з енергетичного менеджменту», а також зареєстровано заявку в Національному агенстві кваліфікацій України на розроблення цього професійного стандарту.

Цей професійний стандарт розроблявся на основі кращих європейських та міжнародних практик [2], і тому він дозволяє забезпечити порівнянність кваліфікацій та мобільність фахівців з енерргетичного менеджменту. Це важливо як для українських енергоменеджерів, які прагнуть працювати в європейських проєктах, так і для адаптації до вимог міжнародних донорських організацій та інвесторів.

Цей стандарт окреслює структуровану систему компетентностей професіонала з енергетичного менеджменту, яка охоплює технічну, економічну, управлінську, аналітичну, нормативну та комунікативну складові. Таким чином, професійний стандарт «Професіонал з енергетичного менеджменту» забезпечує комплексний підхід до формування компетентностей, що охоплюють не лише вузькотехнічну сферу, а й стратегічне управління, економічне обґрунтування, нормативну грамотність та ефективну комунікацію. Саме поєднання цих компетентностей дозволяє фахівцю ефективно виконувати свої функції та забезпечувати досягнення енергетичних цілей компанії.

Після розроблення проєкту цього стандарту, його публічного обговорення, а також виконання всіх інших необхідних дій, визначених в Порядку [3], 4 квітня 2025 року професійний стандарт «Професіонал з енергетичного менеджменту» було затверджено, і 9 квітня 2025 року його було внесено до Реєстру Національного агенства кваліфікацій України [4].

Висновок: Професійні стандарти є критично важливим елементом у формуванні якісного кадрового потенціалу для сталого енергетичного розвитку. Їх використання дозволяє забезпечити відповідність знань і навичок енергоменеджерів сучасним викликам та потребам компаній, сприяє підвищенню енергоефективності підприємств і конкурентоспроможності національної економіки.

ПОСИЛАННЯ

1. Про енергетичну ефективність: Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#n292 (дата звернення: 10.03.2025).
2. Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2018 / О. Бориченко, Є. Іншеков, П. Пертко, О. Соловей, А. Чернявський / За ред. Є. Іншекова та А. Чернявського. UNIDO: Проєкт UNIDO-GEF UKR-IEE, 2021. 130 с.
3. Про затвердження Порядку розроблення, введення в дію та перегляду професійних стандартів: Постанова Кабінету Міністрів України від 31 травня 2017 р. № 373. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2017-%D0%BF#Text (дата звернення: 10.03.2025).
4. Професіонал з енергетичного менеджменту: Професійний стандарт / Затверджено наказом Ректора Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського" від 04.04.2025 № НОД292/25. URL: https://register.nqa.gov.ua/profstandart/profesional-z-energeticnogo-menedzmentu (дата звернення: 14.04.2025).

УДК 621.311.243

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В СОНЯЧНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ: СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРЕСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

С. В. Яцела[1], Н. М. Науменко[2]

Прилуцький технічний фаховий коледж,
вул. Київська, 178, м. Прилуки, 17500, Україна,
тел.: (099) 553-16-24, e-mail: Sveta330@ukr.net

Ключові слова: *сонячна енергетика, інноваційні технології, фітоелектричні системи, перовскітні сонячні елементи, біфасціальні панелі, накопичення енергії, водневі технології, Smart Grid, штучний інтелект, відновлювана енергетика.*

INNOVATIVE TECHNOLOGIES IN SOLAR ENERGY: CURRENT TRENDS AND DEVELOPMENT PROSPECTS

S. Yatsela[1], N. Naumenko[2]

S. Yatsela[1], N. Naumenko[2]
Pryluky Technical Vocational College,
Kyivska Street, 178, Pryluky, 17500, Ukraine
phone: (099) 553-16-24, e-mail: Sveta330@ukr.net

Keywords: *solar energy, innovative technologies, photovoltaic systems, perovskite solar cells, bifacial panels, energy storage, hydrogen technologies, Smart Grid, artificial intelligence, renewable energy.*

ORCID: [2] 0000-0002-4766-4133

Сонячна енергетика останніми десятиліттями зазнала значного розвитку, що сприяло підвищенню її ефективності, зниженню вартості та розширенню сфер застосування. Інноваційні технології у фотоелектричних системах, новітні матеріали та сучасні методи накопичення енергії дозволяють зробити сонячну енергетику ще більш конкурентоспроможною порівняно з традиційними джерелами. У цій статті розглянемо найновіші технологічні досягнення в галузі та їхній потенціал для подальшого розвитку.

Одним з найперспективніших напрямів є розвиток перовскітних сонячних елементів. Вони мають вищу ефективність порівняно з традиційними кремнієвими панелями, легші у виробництві та можуть бути інтегровані в різні типи поверхонь, включно з гнучкими основами. Крім того, перовскітні модулі демонструють високу продуктивність навіть за слабкого освітлення, що дозволяє використовувати їх у регіонах з меншою сонячною активністю.

Ще однією важливою технологією є біфасціальні сонячні панелі, які здатні поглинати світло з обох боків. Це значно збільшує виробництво електроенергії, особливо якщо такі панелі встановлюються на відбивальних поверхнях, наприклад над піщаними або сніговими ділянками. Завдяки цій технології можна досягти на 10–20 % вищої продуктивності без значного збільшення витрат.

Розвиток тонкоплівкових сонячних панелей також відіграє важливу роль у майбутньому сонячної енергетики. Вони мають меншу вагу, можуть встановлюватися на криволінійних поверхнях і використовуються в таких сферах, як будівництво та автомобільна промисловість. Наприклад, інтеграція тонкоплівкових фотоелектричних елементів у дахові покриття або вікна будівель дозволяє ефективно використовувати сонячну енергію без необхідності встановлення традиційних сонячних батарей.

Ще одним важливим напрямом є розвиток технологій накопичення енергії. Літій-іонні акумулятори, які широко використовуються у фотоелектричних системах, поступово замінюються новітніми рішеннями, як-от натрій-іонні батареї, твердооксидні накопичувачі та водневі технології. Зокрема, водневі акумулятори дозволяють зберігати надлишкову енергію у вигляді водню, який потім можна використовувати для виробництва електроенергії в періоди низької сонячної активності.

Інноваційні рішення стосуються також управління сонячними електростанціями. Використання штучного інтелекту та великих даних дає змогу оптимізувати роботу фотоелектричних систем, передбачати зміни в енергоспоживанні та підвищувати ефективність виробництва електроенергії. Інтелектуальні системи можуть аналізувати погоду,

визначати оптимальні кути нахилу панелей та прогнозувати можливі несправності, що зменшує витрати на обслуговування.

Окрім розвитку технологій, важливим є інтегрування сонячної енергетики в розумні міста. Поєднання фотоелектричних систем з електромережами нового покоління (Smart Grid) дозволяє підвищити стабільність енергопостачання, збалансувати навантаження та ефективно використовувати розподілену генерацію. Такий підхід сприяє децентралізації енергетичної системи та підвищенню її надійності.

Отже, інноваційні технології у сфері сонячної енергетики відкривають нові можливості для її розвитку та вдосконалення. Впровадження новітніх матеріалів, вдосконалення систем накопичення енергії та застосування штучного інтелекту дозволять зробити сонячну енергетику ще більш ефективною, доступною та екологічно безпечною. З урахуванням глобальних трендів у галузі відновлюваної енергетики можна очікувати, що найближчими десятиліттями сонячна енергетика стане одним з основних джерел електроенергії у світі.

ПОСИЛАННЯ

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку установок зберігання енергії: Закон України від 15.02.2022 № 2046-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#n8 (дата звернення: 15.07.2022).
2. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text (дата звернення: 04.11.2021).
3. Про затвердження Змін до деяких постанов НКРЕКП: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 29.11.2022 № 1592. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1592874-22#n2 (дата звернення: 04.03.2023).
4. Про затвердження Правил ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 307. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text (дата звернення: 04.11.2021).

ВИКОРИСТАННЯ ВОДНЕВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ВІДНОВЛЕННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ: ПЕРСПЕКТИВИ СТВОРЕННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ АВТОНОМНИХ ЕНЕРГОКОМПЛЕКСІВ

Д. Є. Борисович

Гімназія № 3 Чернігівської міської ради,
вул. Гетьмана Полуботка, 14, м. Чернігів, 14000, Україна
тел.: (063)4855015, e-mail: dedsec23ti@gmail.com

У статті розглянуто потенціал використання водневої енергетики для відновлення енергосистеми України під час воєнних дій. Досліджено можливість створення децентралізованих енергетичних систем на основі водню, а також екологічні переваги.

Ключові слова: *воднева енергетика, автономні енергосистеми, відновлення енергосистеми, відновлювані джерела енергії, водневі технології, енергетична незалежність.*

Щоденно енергетична інфраструктура України зазнає обстрілів, що призводить до масштабних відключень електроенергії, перебоїв у роботі підприємств і критично важливих об'єктів, як-от лікарень, реабілітаційних центрів, шкіл тощо.

Одним із напрямів вирішення проблеми є **воднева енергетика**, зокрема створення **автономних енергосистем.** Такі системи працюють на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та водневих технологій, що дозволяє їм функціонувати навіть за відключення від централізованої мережі.

У роботі використано методи дослідження літератури, порівняльного аналізу з іншими типами отримання енергії, а також економічне оцінювання впровадження водневих технологій.

Водневі енергосистеми працюють на основі **відновлюваних джерел енергії (ВДЕ**), що виробляють електроенергію, яка подається на електролізер. В електролізері відбувається розкладання води (H_2O) на водень (H_2) та кисень (O_2). Отриманий водень і кисень зберігаються у високотискових резервуарах або в рідкому стані. Коли є потреба у виробництві електроенергії, водень подається у паливний елемент, де він вступає в реакцію з киснем, утвореним в електролізері або киснем навколишнього повітря, утворюючи електроенергію, воду та тепло. Генерований струм проходить через інвертор, який перетворює постійну напругу паливного елемента на змінну для живлення споживачів.

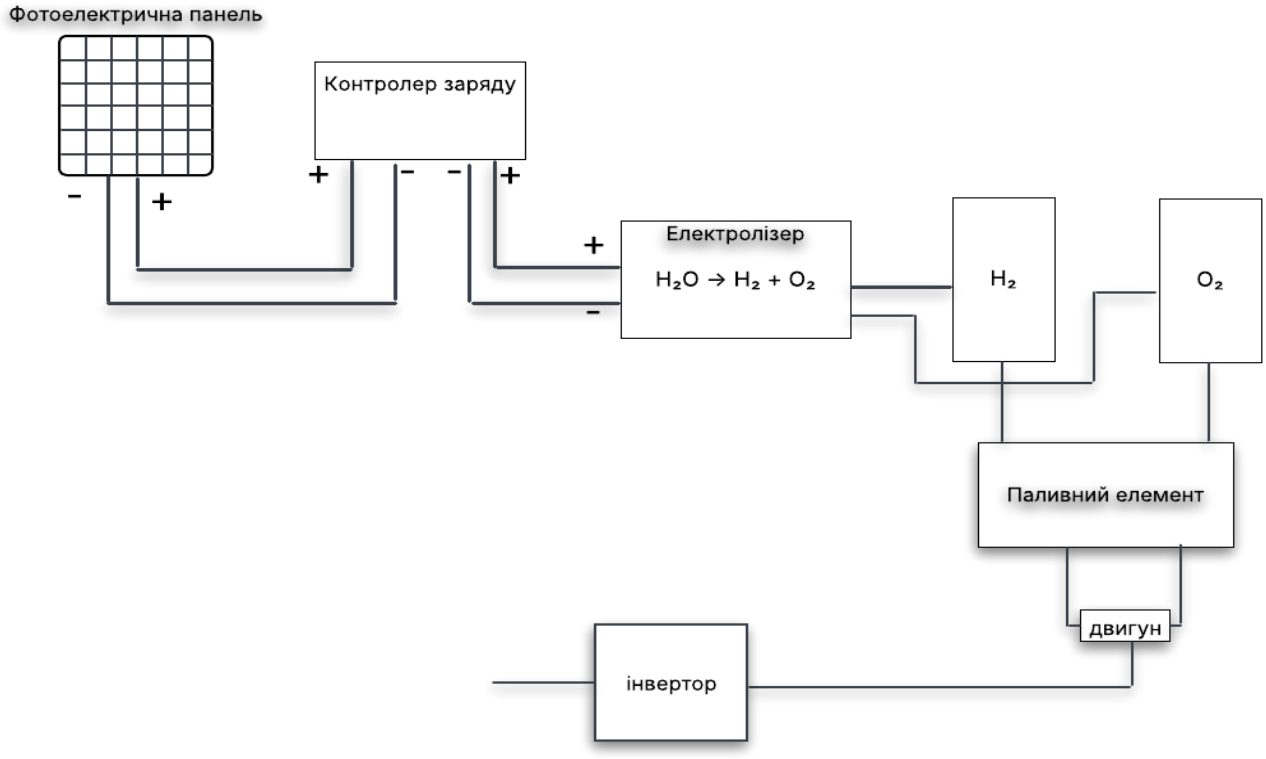


Рис. 1. Схема роботи автономної водневої енергосистеми

Водневі енергосистеми мають високі початкові капіталовкладення, близько 1000–2000 дол. США, але низькі експлуатаційні витрати, тривалий термін служби, приблизно 20–30 років, та нульові викиди CO_2. Порівняно з дизель-генераторами вони значно дешевші в експлуатації та екологічно безпечніші. Літій-іонні батареї підходять для короткочасного зберігання енергії, але поступаються водневим системам у довготривалій автономності. Традиційні ТЕС залишаються конкурентоспроможними за вартістю енергії (LCOE), але мають значний екологічний вплив та залежність від корисних копалин.

Висновки

Використання водневої енергетики для відновлення енергосистеми України є перспективним напрямом в майбутньому, оскільки сприятиме зменшенню залежності від корисних копалин (палив).

Запропонована схема енергосистеми на основі водню дозволяє інтегрувати ВДЕ, забезпечуючи стабільне енергопостачання навіть у кризових умовах.

Основними складовими таких комплексів є ВДЕ, електролізери, системи зберігання водню та водневі паливні елементи, що дозволяють перетворювати накопичену енергію у форму, зручну для використання.

Аналіз економічної вигідності показав, що хоча початкові витрати на створення системи є високими, у довгостроковій перспективі вони показують значне зниження витрат на використання й ремонт і підвищують енергетичну незалежність.

ПОСИЛАННЯ

1. Воднева стратегія України на період до 2050 року. URL: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
2. Етапи розвитку зеленої водневої енергетики України / за ред. О. М. Шевченка. Київ: Академперіодика, 2022. URL: https://www.researchgate.net/publication/361698458_ETAPI_ROZVITKU_ZELENOI_VODNEVOI_ENERGETIKI_UKRAINI (дата звернення: 10.03.2025).
3. Водневі технології зберігання енергії: стан та перспективи розвитку / за ред. О. В. Ковальчука. Київ: Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича НАН України, 2023. URL: https://www.materials.kiev.ua/edition/26 (дата звернення: 10.03.2025).
4. Комплексні енергетичні системи на основі ВДЕ / за ред. Ю. М. Білого. Київ: Відновлювана енергетика, 2021. URL: https://ve.org.ua/index.php/journal/article/download/306/227/ (дата звернення: 10.03.2025).

УДК 621.311.243

ПРИНЦИПИ ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ З АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ

М. О. Заїка

Чернігівська гімназія № 3 Чернігівської міської ради,
вул. Гетьмана Полуботка, 14, м. Чернігів, 14000, Україна,
тел: (066) 768 96 58, e-mail: zaikamatvij@gmail.com

Під час розв'язняі поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі дослідження видів та механізму роботи сонячних електростанцій, а також можливостей різного типу їх розміщень.

Ключові слова: *сонячні електростанції, електроенергія, енергосистема, сонячні панелі, енергія Сонця, електрична мережа.*

У тяжкі для нашої держави часи війни дуже поширені проблеми нестачі електроенергії та відсутності (переривання) шляхів її постачання внаслідок атак ворога на нашу енергетичну систему. Сонячні електростанції є одним із рішень для забезпечення електроенергією. У цій роботі описуються види сонячних електростанцій, принципи їх роботи та сфери застосування. Принципом цього методу одержання електроенергії є перетворення сонячної енергії за допомогою кремнієвих кристалів на електричний струм. Використання енергії Сонця не тільки забезпечує часткову енергетичну незалежність, а й дозволяє суттєво економити кошти їх власників та покращувати становище енергосистеми нашої держави. Залежно від потреби в електроенергії найчастіше застосовуються гібридні або мережеві електростанції, які застосовуються на об'єктах приватного сектору, комерційних об'єктах та об'єктах інфраструктури. Сонячні панелі можуть розташовуватися як на дахах будинків, так і на наземних конструкціях. Розміщення їх на дахах будівель дає можливість використовувати їх у населених пунктах з обмеженою вільною територією. Робота сонячних електростанцій залежить від погодних умов, а також пори року, оскільки вони працюють від енергії Сонця, системи з акумуляторами дозволяють зменшити вплив цих факторів. Пропонується будувати ці станції на територіях, які не є сприятливими для життя та будь-яких робіт, наприклад території сміттєзвалищ або Чорнобильська зона відчуження, що дасть зможу економити придатну для життя територію. Ще одним зі шляхів ефективного використання територій є інтегрування панелей у різні конструкції. Прикладами таких конструкцій можуть бути навіси над парковками та автобусними зупинками, паркани. За допомогою невеликих мобільних сонячних електростанцій є можливість забезпечення електроенергією людей, які працюють у специфічних умовах: рятівників або військових. Вони допомагатимуть виконанню різних робіт там, де немає доступу до електромережі. Завдяки цій технології ми маємо змогу покращити роботу енергосистеми нашої країни та забезпечувати рятівників і військових в умовах відсутності електричної мережі, а також використовувати «елен» енергію.

ПОСИЛАННЯ

1. Досвід експертів компанії ТОВ «Солар».

УДК: 621.311.24:625.7/.8

АВТОНОМНЕ ЖИВЛЕННЯ СВІТЛОФОРА ЗА ДОПОМОГОЮ ОБЕРТАЛЬНОГО МЕХАНІЗМУ З СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ

І. О. Коверсун[1], О. В. Козленко[2], С. М. Тернавська[3]

[1, 3]Спеціалізована школа № 52, м. Київ, Україна, [2]НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського", м. Київ, Україна

У роботі розглянуто можливість облаштування незалежного від мережі електроживлення світлофора за допомогою сонячних панелей та зміни конструкції кріплення. Дослідження проведено із застосуванням математичних розрахунків, аналізу технічних характеристик досліджуваних об'єктів та вивчення вже проведених практичних рішень.

***Ключові слова**: світлофор, сонячна панель, автономне електроживлення, безпека дорожнього руху, накопичення енергії, кріплення сонячних панелей.*

AUTONOMOUS POWER SUPPLY OF THE TRAFFIC LIGHT WITH A ROTATING MECHANISM WITH SOLAR PANELS

I. Koversun[1], O. Kozlenko[2], S. Ternavska[3]

[1, 3]School № 52, Kyiv, Ukraine, [2]NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

This work considers the possibility of arranging a traffic light independent of the power supply network by using solar panels and changing the the design of the mount. The study was conducted using mathematical calculations, analysis of the technical characteristics of the studied objects and the study of already implemented practical solutions.

***Keywords**: traffic light, solar panel, autonomous power supply, road safety, energy storage, solar panel mounting.*

ORCID: [1]0009-0006-5831-1049

Знеструмлення світлофорів через аварійні та планові відключення електроенергії спричиняє небезпеку на дорогах [1, 4]. Для вирішення цієї проблеми запропоновано автономну систему живлення світлофора з використанням сонячних панелей, розміщених на обертовому механізмі. Також ця конструкція вирішує проблеми парусності, зменшує нагрівання, що підвищує ефективність вироблення енергії [2, 3]. Основні завдання роботи були такі: скласти конструкцію з сонячних панелей, що обертаються, визначити її якості; розрахувати достатню потужність, щоб задовольнити потреби світлофора та визначити час роботи; дослідити необхідні складники системи.

Проведено експеримент: 4 сонячні панелі загальною площею фотоелементів 215,6 см^2 розміщено по колу на трубі, змодельовано обертання за допомогою лопатей. Виміряно напругу й силу струму в різних умовах (рис. 1–4, табл. 1).

Таблиця 1. Результати експерименту

Умови вимірювання	Напруга U, В	Сила струму I, мА
Відразу після ввімкнення лампи	6,68	88,8
Через хвилину після ввімкнення лампи	6,41	57
При обертанні труби	6,43	110,1
Середнє значення	6,51	85,3

Одна панель дає потужність 0,18 Вт (напруга – 6,5 В, сила струму – 0,03 А), тоді кільце з 7 панелей вироблятиме 1,25 Вт. Для вибраного світлофора необхідно не менше 15 Вт, але, враховуючи можливі коливання, варто виробляти потужність з запасом. Згідно з розрахунками, нам потрібно 14 таких кілець, які загалом вироблятимуть 17,5 Вт. Тож нам потрібно 14 кілець по 7 панелей з загальною площею фотоелементів 0,53 м^2, закріплених на трубі, що

обертається під впливом вітру, який рухає лопаті. Всередині стовпа розташований підвищувальний перетворювач XL6019 та акумулятор типу AGM, що має ємність 24 А · год та напругу 12 В і може безперебійно живити світлодіодний трисекційний світлофор, що споживає потужність 15 Вт протягом 16 год [5, 6].

Рис. 2. З'єднання дротів

Рис. 3. Отримана конструкція

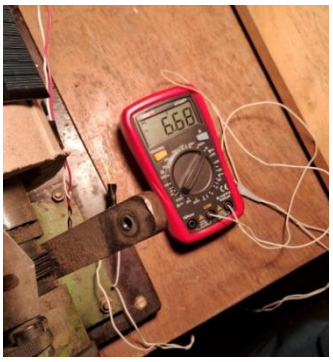


Рис. 4. Напруга після ввімкнення лампи

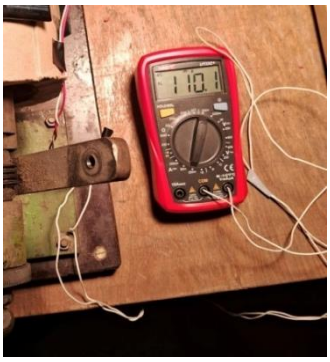


Рис. 5. Сила струму під час обертання

Отже, ми отримали екологічно дружній варіант заживлення світлофора, який, крім того, зводить ризики руйнування вітром системи до мінімуму та підвищує ефективність вироблення енергії. Також ця система автономного живлення дозволить світлофору бути незалежним від мережі й не страждатиме в разі припинення електропостачання. Таку обертальну систему сонячних панелей можна застосовувати не тільки для світлофорів, а й для вуличного освітлення, рекламних вивісок, інформаційних табло для водіїв, побутових потреб тощо, якщо змінити площу панелей відповідно до вимог устаткування.

ПОСИЛАННЯ

1. № 13043 Встановити сонячні панелі на світлофори з дорогами, де є дві або більше полос в обох напрямках – Електронні петиції. Київська міська рада. URL: https://petition.kyivcity.gov.ua/petition/?pid=13043 (дата звернення: 03.12.2024)
2. Solar Farms and Wind Turbines Tested and Failed by Storm Darragh – TheCivilEngineer. URL: https://www.thecivilengineer.org/news/solar-farmsand-wind-turbines-tested-and-failed-by-storm-darragh (дата звернення: 03.12.2024)
3. The Truth About Solar Panels in Hurricanes. URL: https://www.attainablehome.com/how-do-solar-panels-in-hurricanes/ (дата звернення: 03.12.2024)
4. Кияни просять встановити на світлофорах сонячні панелі. URL: https://bzh.life/ua/gorod/1721831108-kiyani-prosyat-vstanoviti-svitloforah-sonyachni/ (дата звернення: 03.12.2024)
5. Регульований підвищуючий перетворювач DC-DC (XL6019). URL: https://rozetka.com.ua/ua/373720254/p373720254/ (дата звернення: 07.12.2024)
6. Світлофор світлодіодний трисекційний. URL: https://toptovary.com.ua/ua/p2168930397-svetofor-svetodiodnyj-led.html (дата звернення: 06.12.2024)

УДК 620.9:005.932

ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МЕНЕДЖМЕНТУ В НАВЧАЛЬНОМУ КОРПУСІ № 22 НАВЧАЛЬНО-НАУКОВОГО ІНСТИТУТУ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ КПІ ІМ. ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО

***Д. Брюховських*[1]**

[1]Спеціалізована школа № 131 м. Києва,
вул. Литвиненко-Вольгемут, 2, Київ, 03194,

У роботі досліджено процес впровадження енергетичного менеджменту в навчальному корпусі № 22 НН ІЕЕ НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Проаналізовано структуру енергопостачання та енергоспоживання будівлі, визначено співвідношення між організаційними та технічними заходами в енергоменеджменті. Проведено оцінку енергоефективності та економічних показників запропонованого проєкту на основі моделі споживання енергії.

Ключові слова: *енергетичний менеджмент, енергоефективність, навчальний корпус, відновлювані джерела енергії, енергоспоживання.*

IMPLEMENTATION OF ENERGY MANAGEMENT IN THE EDUCATIONAL BUILDING № 22 OF THE EDUCATIONAL AND SCIENTIFIC INSTITUTE OF ENERGY SAVING AND ENERGY MANAGEMENT OF IGOR SIKORSKY KYIV POLYTECHNIC INSTITUTE

***D. Briukhovskykh*[1]**

Specialized School №131 of Kyiv,
2 Lytvynenko-Volhemut str., Kyiv, Ukraine, 03194

The paper investigates the process of implementing energy management in the educational building № 22 of the IEE NTUU "Igor Sikorsky KPI". The structure of energy supply and energy consumption of the building was analyzed, the relationship between organizational and technical measures in energy management was determined. An assessment of energy efficiency and economic indicators of the proposed project based on the energy consumption model was carried out.

Key words: *energy management, energy efficiency, educational building, renewable energy sources, energy consumption.*

В Україні дефіцит паливно-енергетичних ресурсів становить 45−50 % загального обсягу споживання. Крім того, питоме споживання енергії є вищим, ніж у країнах Європейського Союзу, приблизно в три рази. У зв'язку з цим виникає необхідність підвищення енергоефективності підприємств, організацій та установ. Енергетичний менеджмент виступає ключовим аналітичним інструментом для ефективного моніторингу та аналізу прогресу в зниженні енергоспоживання. Його впровадження є запорукою підвищення енергоефективності [1].

Актуальність дослідження обумовлена подорожчанням традиційних енергоресурсів та електроенергії, загальною тенденцією до диверсифікації джерел енергоспоживання, а також викликами, спричиненими російсько-українською війною, що підкреслює важливість впровадження систем енергетичного менеджменту.

Метою дослідження є вивчення процесу впровадження енергетичного менеджменту в навчальному корпусі № 22 НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського, розглядаючи його технічні та економічні аспекти.

До основних споживачів електроенергії в навчальному корпусі № 22 належать системи освітлення, зарядні пристрої для електронних пристроїв, інтерактивні дошки, лабораторне обладнання та стенди. Забезпечення електроенергією здійснюється як від централізованої мережі, так і частково за рахунок фотогальванічних генераторів, встановлених на даху будівлі [2].

Будівля корпусу має сім поверхів, сполучених між собою сходовими маршами. На першому поверсі функціонує лабораторія, обладнана тепловим насосом для забезпечення потреб у тепловій енергії. На сьомому поверсі працює лабораторія «Відновлених джерел енергії».

На третьому поверсі навчального корпусу функціонує лабораторія, що отримує електроенергію від фотоелектричних генераторів, з підключеними реєстраторами споживання. У межах дослідження розроблено повну електричну схему енергопостачання корпусу.

Важливим етапом є здійснення фінансового аудиту з метою визначення поточних рівнів енергоспоживання та оцінки можливого ефекту від впровадження заходів з енергоменеджменту. Планується впровадження дискретних лічильників, розподіленої системи управління, програмованих логічних контролерів, баз даних для збору та аналізу енергетичної інформації та енергозберігаючого обладнання.

Проведене дослідження показало, що впровадження системи енергетичного менеджменту в навчальному корпусі № 22 НН ІЕЕ КПІ ім. Ігоря Сікорського дозволить значно підвищити енергоефективність будівлі, сприятиме диверсифікації джерел енергопостачання та зменшенню витрат на енергоресурси.

ПОСИЛАННЯ

1. Енергетичний менеджмент та енергоефективність: підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / І. О. Самойленко, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець та ін. Харків: ФОП Бровін О. В., 2020. 348 с.
2. Чернявський А. В., Іншеков Є. М., Соловей О. І., Бориченко О. В., Пертко П. П. Керівництво з впровадження системи енергетичного менеджменту відповідно до вимог міжнародного стандарту ISO 50001:2018: навч. посіб. / за ред. Є. М. Іншекова, А. В. Чернявського. Київ: Проєкт UNIDO/GEF «Впровадження стандарту систем енергоменеджменту в промисловості України», 2021. 137 с.

УДК 621.311.6:621.3.082.4

РОЗРОБКА КОНСТРУКЦІЇ ДЖЕРЕЛА ЖИВЛЕННЯ НИЗЬКОЇ ПОТУЖНОСТІ НА ОСНОВІ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТІЛКИ ДЛЯ ВЗУТТЯ

Є. В. Войтович[1], О. Ю. Мєшков[2]

Український фізико-математичний ліцей КНУ імені Тараса Шевченка,
просп. Академіка Глушкова, 6, Київ, 03022
тел.: (098) 395-63-65, e-mail: chockoelza@gmail.com

Актуальна проблема, яка полягає в неможливості зарядити електронні девайси за допомогою традиційних джерел живлення в певних умовах, може бути розв'язана запропонованою ідеєю створити п'єзоелектричну устілку. Це рішення дозволяє досягнути однієї з глобальних цілей сталого розвитку. У цьому проєкті розглянуто теоретичний аналіз прямого п'єзоелектричного ефекту та розподіл тиску по стопі, проведено експерименти з порівняння п'єзоелементів, перевірки дієвості технології з використанням стенда, дослідження устілки за допомогою осцилографа та узгодженості моделі устілки з накопичувачем енергії, а також дослідження динаміки функціонування розробленого пристрою та оцінено його ККД.

Ключові слова: *п'єзоелектрик, п'єзоелектричний ефект, електрична енергія, ходьба, електрична схема.*

CREATION OF CONSTRUCTION OF LOW POWER ENERGY SOURCE BASED ON THE PIEZOELECTRIC INSOLE FOR SHOES

E. Voitovych[1], O. Mieshkov[2]

Український фізико-математичний ліцей КНУ імені Тараса Шевченка,
проспект Академіка Глушкова, 6, Київ, 03022
phone: (098) 395-63-65, e-mail: chockoelza@gmail.com

A relevant problem based on an inability of electric devices` charge using traditional power devices in different circumstances might be resolved by the proposed idea to create a piezoelectric insole. This solution lets us reach one of the Sustainable Development Goals. In this project theoretical analysis of direct piezoelectric effect and plantar pressure distribution are studied; experiments of comparison piezoelements, checking the effectiveness of technology with the usage of the stand have been examined; studying of the developed insole`s parameters and consistency of the insole`s model with the electrical energy accumulator, studying of the dynamics of the developed construction functioning and efficiency coefficient have been held.

Key words: *piezoelectric material, piezoelectric effect, electrical energy, human`s walk, electric scheme.*

ORCID: [1]0009-0000-3727-5313; [2]0000-0001-8844-9790

Іноді виникає проблема, яка полягає в неможливості зарядити девайси за допомогою традиційних джерел живлення в певних умовах. Тим паче, що в Україні обстріли спричинюють відключення світла побутових споживачів. Ці питання є актуальними, оскільки стосуються одної з цілей сталого розвитку. Рішенням є створення конструкції спеціальної устілки, що генерує напругу за допомогою п'єзоелектричних елементів під час ходьби людини. П'єзоелектрик – діелектрик, який може утворювати навколо себе електричне поле при його деформації. Це явище називається п'єзоелектричним ефектом [1], і саме воно є основою для розробки моделі устілки. За результатами теоретичного аналізу [2, 3] характеристик різних п'єзоелементів та експериментального дослідження двох п'єзоелементів з певними конструкційними особливостями для запропонованої розробки було вибрано керамічні п'єзоелементи, які не мають жорсткої основи і здатні прогинатись в області кристалу. Щоб дослідити запропоновану технологію, розроблено спеціальний стенд, за допомогою якого визначається кількість накопиченої енергії під час ходьби з двох зон розміщення п'єзоелементів. Методика експерименту така. Конструкція закріплена на підлозі. Людина робить два кроки, під час третього наступає на установку, потім робить ще два кроки. Це робиться для відтворення повноцінної звичайної ходьби. Після кожного кроку фіксується значення напруги на конденсаторах і визначається кількість електричної енергії, згенерованої за кожен крок. Аналіз даних полягає в дослідженні залежності вихідної напруги та накопиченої енергії від кількості натискань на стенд. Результати, отримані в процесі експерименту на

вибірці людей, показують, що вигідніше розміщувати п'єзоелементи в зоні передньої частини стопи. Ці результати й технологія стали основою для подальшої розробки моделей запропонованої устілки.

Також для точної оцінки миттєвої вихідної напруги використано портативний осцилограф. У результаті виявлено, що тенденція накопичення більшої електричної енергії в зоні передньої частині стопи, ніж в зоні п’яти, отримана під час первинного дослідження зі стендом, є такою самою, як і та, що спостерігалась в експерименті. Оскільки ця конструкція є джерелом живлення низької потужності, для накопичення електричної енергії у дослідженні використовувались підвищувальний перетворювач [4] з літій-полімерним акумулятором ємністю 200 мА*год. Для дослідження динаміки роботи розробленої устілки до неї підключається літій-полімерний акумулятор. Методика експерименту полягає в ходьбі людини з устілкою та накопичувачем в приміщенні. Кожні 15 хв напруга на акумуляторі фіксується за допомогою мультиметра. При цьому синхронно за допомогою фітнес-трекера фіксується кількість енергії, яку витрачає людина під час ходьби. Кожні пів години людина робить перерву для відпочинку та відновлення сил, при цьому устілка виймається із взуття, а акумулятор відмикається від неї. Результати експерименту показують, що з часом напруга на акумуляторі досягає насичення, а середня потужність заряджання акумулятора зменшується. Це є типовим явищем при заряджанні акумуляторів, зокрема і стандартними методами. Очевидна сталість значень під кінець експерименту наштовхувала на думку про те, що після 4-5 годин експерименту устілка могла вийти з ладу, однак подальша зарядка акумулятора та перевірка усіх складових конструкції після проведення експерименту спростувала це припущення. Однак ці результати свідчать про необхідність удосконалення розробленої конструкції спеціальними сенсорами для моніторингу стану ключових елементів конструкції для виявлення можливих неладів. ККД розробленої устілки визначалось як відношення електричної енергії, накопиченої в акумуляторі, до енергії, витраченої людиною під час ходьби. Безумовно, не можна стверджувати, що вся витрата енергії, яку фіксував фітнес-трекер, спрямовувалась саме на ходьбу людини, тому отримані дані є оцінкою, і насправді мають більші значення. Значення ККД розробленої конструкції коливалось у діапазоні від 0,9 % на початку до 0,32 % у кінці експерименту, що є доволі малим значенням. Однак з урахуванням особливостей способу отримання електричної енергії та методики оцінки цього показника, яка дає занижені результати, можемо стверджувати, що на цьому етапі розробки установка дає доволі непогані результати й може досягти більших значень ККД у процесі подальших удосконалень.

Розроблена устілка є готовим продуктом, який можна буде пропонувати як окремим побутовим споживачам (близько 80 % загальної кількості клієнтів), так і приватним організаціям, навчальним закладам (близько 15 % ринку), а також навіть державним підприємствам (орієнтовно 5 % споживачів). В аспекті сегментації ринку найближчим доступним ринком є ліцеїсти, що проживають у гуртожитку Українського фізико-математичного ліцею КНУ. Досяжним об'ємом ринку є близько 1,5 млн мешканців Києва. Загальним розміром ринку на цьому етапі є близько 15 млн мешканців України. Проте розглядаються варіанти виходу на ринки Європи, де зараз дуже актуальними є питання використання екологічно чистих джерел екологічної енергії не лише на рівні урядів та підприємств, а й на рівні побутових споживачів. Маркетингова стратегія насамперед полягає в остаточному формуванні робочої моделі устілки з урахуванням усіх наведених вище особливостей. Наступним етапом є масове виробництво, де за місяць виготовлятиметься певна кількість пар устілок, і, як наслідок, можна буде дослідити попит споживачів на товар. Після цього буде організовано серійне виробництво продукції для продажу в інтернет магазині.

ПОСИЛАННЯ

1. Нові речовини. Частина 2. П’єзоелектричні та сегнетоелектричні матеріали: Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 274 с. Іл. 177. Табл. 27, Бібл.: 125 назв.
2. Shuang, Jiawei & Haron, Athia & Massey, Garry & Mansoubi, Maedeh & Dawes, Helen & Bowling, Frank & Reeves, Neil & Weightman, Andrew & Cooper, Glen. (2024). The effect of calcaneus and metatarsal head offloading insoles on healthy subjects’ gait kinematics, kinetics, asymmetry, and the implications for plantar pressure management: A pilot study. PLOS ONE. 19. 10.1371/journal.pone.0303826.
3. Haris, Fahni & Jan, Yih-Kuen & Liau, Ben-Yi & Hsieh, Chang-Wei & Shen, WeiCheng & Tai, Chien-Cheng & Shih, Yin-Hwa & Lung, Chi-Wen. (2023). The effects of different inner pressures of air insoles and walking durations on peak plantar pressure. Medicine. 102. e35704. 10.1097/MD.0000000000035704.
4. Підвищувальний перетворювач DC-DC https://myproject.com.ua/pidvischuvalnij-peretvorjuvach-dc-dc-ua.html

УДК 620.9:643/645:332.8

ІННОВАЦІЙНІ ПІДХОДИ ДО ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ ДОНЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ

К. І. Іванюра[1], О. І. Деканенко[1]

[1]Зорянський заклад загальної середньої освіти
ім. Героя Радянського Союзу П. С. Дубрівного,
вул. Дубрівного, 72, с-ще Зоря, Донецька обл., Україна
тел.: 099427931222, e-mail: dekanenkolena@gmail.com

Під час розв'язання поставлених у роботі задач було проведено комплексний аналіз сучасних технологій та підходів до підвищення енергоефективності в житловому секторі Донецької області. Основна увага приділялася термомодернізації будівель, використанню відновлюваних джерел енергії, впровадженню розумних енергетичних систем та застосуванню новітніх будівельних матеріалів

***Ключові слова**: енергоефективність, житловий сектор, альтернативні джерела енергії, термомодернізація, розумні енергетичні системи.*

INNOVATIVE APPROACHES TO IMPROVING ENERGY EFFICIENCY IN THE RESIDENTIAL SECTOR OF DONETSK REGION

K. Ivaniura[1], O. Dekanenko[1]

[1]Zoryansky Secondary School named after Hero of the Soviet Union P.S. Dubrivny,
72 Dubrivny Street, Zorya settlement, Donetsk region, Ukraine
phone.: 099427931222, e-mail: dekanenkolena@gmail.com

In solving the tasks set in the work, a comprehensive analysis of modern technologies and approaches to increasing energy efficiency in the residential sector of the Donetsk region was conducted. The main attention was paid to the thermal modernization of buildings, the use of renewable energy sources, the implementation of smart energy systems, and the use of modern building materials.

***Key words**: energy efficiency, residential sector, alternative energy sources, thermal modernization, smart energy systems.*

Енергоефективність у житловому секторі є ключовим чинником зменшення енергоспоживання, підвищення комфорту мешканців та зниження витрат на опалення й електроенергію. У Донецькій області, враховуючи її кліматичні умови та післявоєнну відбудову, енергоефективні рішення мають стратегічне значення. Інноваційні підходи дозволяють значно покращити ефективність використання ресурсів та підвищити рівень екологічної безпеки регіону [1, 2].

Серед інноваційних підходів до підвищення енергоефективності можна виділити:

1. Розумні енергетичні системи

- Автоматизовані системи управління споживанням енергії, як-от «розумні» лічильники, сенсори температури та вологості, дозволяють ефективніше використовувати електроенергію та тепло. Інтеграція таких технологій може знизити споживання електроенергії на 15–30 %.
- Інтелектуальні енергетичні системи (Smart Grid) для розподілу навантаження на електромережі [5].

2. Термоізоляція житлових будівель

- Один з найдієвіших методів підвищення енергоефективності – утеплення фасадів, дахів, заміна вікон на енергозберігаючі та модернізація систем опалення. Використання інноваційних матеріалів, таких як аерогелі, енергоефективне скло та полімерні утеплювачі, дозволяє зменшити тепловтрати до 50 % [6].

3. Використання альтернативних джерел енергії

- Розвиток сонячної та вітрової енергетики в Донецькій області є перспективним напрямом завдяки природним умовам регіону. Встановлення сонячних панелей на житлових будинках та використання теплових насосів

дозволить частково або повністю замінити традиційні джерела енергії, зменшуючи витрати на комунальні послуги [7].

4. Модернізація систем теплопостачання

- Впровадження локальних теплових пунктів і теплових насосів сприятиме зменшенню втрат теплової енергії та підвищенню автономності систем опалення [8].

5. Використання енергоефективних будівельних матеріалів

- Будівництво та реконструкція житлових будівель із застосуванням матеріалів, що мають високі теплоізоляційні властивості, сприятиме скороченню витрат енергії на обігрів та охолодження приміщень [9–11].

Для успішного впровадження енергоефективних рішень необхідна державна підтримка та залучення міжнародних інвесторів. Програми грантового фінансування, пільгові кредити та державні субсидії можуть стати ключовими механізмами стимулювання розвитку енергоощадних технологій у житловому секторі Донецької області.

Отже, підвищення енергоефективності житлового сектору Донецької області є необхідною складовою сталого розвитку регіону. Впровадження сучасних технологій, фінансових механізмів та державної підтримки дозволить значно покращити рівень комфорту мешканців, підвищити економічну ефективність енергоспоживання та зменшити залежність від традиційних енергоресурсів.

ПОСИЛАННЯ

1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text (дата звернення: 11.03.2025).
2. Державна стратегія з енергоефективності України до 2030 року. URL: https://mev.gov.ua/files/docs/strategy2030.pdf (дата звернення: 10.03.2025).
3. Smart Metering Benefits and Challenges: European Commission, 2021. URL: https://energy.ec.europa.eu (дата звернення: 09.03.2025).
4. Пелих В. Сучасні енергозберігаючі технології в ЖКГ. Київ: НАЕР, 2022.
5. Smart Grid Roadmap for Ukraine: Analysis and Recommendations. – World Bank, 2020. URL: https://worldbank.org (дата звернення: 15.03.2025).
6. ISO 13790:2017 – Energy performance of buildings – Calculation of energy use for space heating and cooling. URL: https://www.iso.org/standard/41974.html (дата звернення: 11.03.2025).
7. Solar Energy Solutions for Eastern Europe. IRENA, 2022. URL: https://irena.org (дата звернення: 11.03.2025).
8. Український центр енергоефективності. Енергозбереження в ЖКГ. Київ, 2022.
9. Energy-Efficient Heating Systems in Residential Buildings. European Energy Agency, 2021. URL: https://eea.europa.eu (дата звернення: 10.03.2025).
10. Енергозбереження та технології утилізації тепла. Київ: Інститут теплоенергетики, 2022.
11. ESCO Mechanisms in Energy Efficiency Projects: Best Practices and Case Studies. UNIDO, 2021. URL: https://unido.org (дата звернення:10.03.2025).

УДК 621.565.83

КОНДИЦІОНЕР НА ЕЛЕМЕНТАХ ПЕЛЬТЬЄ

В. Ю. Кермач[1], А. А. Леоненко[1]

[1]Славутський ліцей Хмельницької обласної ради, вул. Князів Сангушків, 8, м. Славута, Україна, тел.: (067) 123-45-67, e-mail: kermachviktoriia@gmail.com

У сучасному світі через кліматичні зміни на планеті постає необхідність охолодження повітря до необхідних температур. Виникло питання про створення нових та вдосконалення вже існуючих пристроїв, які могли б охолоджувати і в разі необхідності нагрівати повітря і при цьому були екологічними, компактними, дешевими в обслуговуванні, енергоефективними, надійними й стійкими до різних умов. Проєкт спрямований на розробку портативного екологічного та енергоощадного кондиціонера на основі елементів Пельтьє. Це дозволяє ефективно охолоджувати повітря в приміщенні без використання холодоагентів, що робить систему більш екологічною та безпечною.

Ключові слова: *кондиціонер, елемент Пельтьє, енергоефективність, термоелектричні модулі, Arduino.*

AIR CONDITIONER BASED ON PELTIER ELEMENTS

V. Kermach[1], A. Leonenko[1]

[1]Slavuta Lyceum of Khmelnytskyi Regional Council, 8 Kniaziv Sangushkiv str., Slavuta, Ukraine, phone: (067) 123-45-67, e-mail: kermachviktoriia@gmail.com

In the modern world, due to climate changes on the planet, there is a need to cool air to the required temperatures. The question has arisen about creating new and improving existing devices that could cool and, if necessary, heat the air while being environmentally friendly, compact, inexpensive to maintain, energy efficient, reliable, and resistant to various conditions. The project is aimed at developing a portable, environmentally friendly, and energy-saving air conditioner based on Peltier elements. This allows effective cooling of indoor air without using refrigerants, making the system more environmentally friendly and safe.

Key words: *air conditioner, Peltier element, energy efficiency, thermoelectric modules, Arduino.*

Методологія дослідження включала проєктування, монтаж і тестування робочого прототипу кондиціонера. Електрична схема приладу побудована на базі мікроконтролера Arduino Nano, що забезпечує керування роботою термоелектричних модулів, системою охолодження та інтерфейсом користувача (рис.1).

Основними компонентами системи є два елементи Пельтьє, релейні модулі, датчик температури, дисплейний модуль TM1637, цифровий енкодер та система рідинного охолодження з помпою. Термоелектричні модулі Пельтьє функціонують на базі однойменного ефекту, який полягає у виникненні різниці температур між поверхнями напівпровідникового елемента при пропусканні через нього електричного струму [1, 2]. Використання двох модулів з робочою напругою 12 В і струмом 6 А забезпечує охолоджувальну потужність 21,6 Вт, що дозволяє знизити температуру в приміщенні об'ємом 10 м³ на 10 °С протягом 93 хв. Особливістю розробленої системи є рідинне охолодження гарячої сторони елементів Пельтьє, що підвищує ефективність теплообміну та запобігає перегріву модулів. Циркуляція охолоджувальної рідини забезпечується водяною помпою, контроль температури здійснюється датчиком, підключеним до Arduino.

Система керування реалізує три робочі режими: нагрівання (режим 1), охолодження (режим 2) та моніторинг температури води в резервуарі (режим 3). Програмне забезпечення для Arduino розроблено з використанням стандартних бібліотек для роботи з дисплеєм TM1637 та цифровим енкодером, що забезпечує зручний користувацький інтерфейс. Теоретичні розрахунки ефективності кондиціонера базувались на формулах теплообміну та енергетичного балансу. Кількість теплової енергії, яку необхідно відвести з приміщення об'ємом 10 м³ для зниження температури на 10 °С, становить:

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T, \quad (1)$$

де $m = \rho \cdot V = 1{,}2$ кг/м³·10 м³ = 12 кг – маса повітря, $c = 1005$ Дж/(кг·°С) – питома теплоємність повітря, $\Delta T = 10$°С – зміна температури.

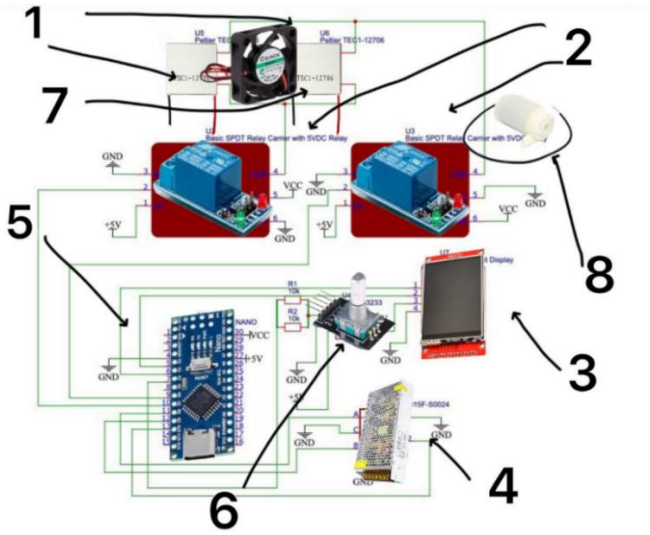


Рис. 1. Складові схеми кондиціонера: 1 – елементи Пельтьє, 2 – реле, 3 – дисплей, 4 – блок живлення, 5 – Arduino Nano, 6 – енкодер, 7 – помпа, 8 – вентилятор, 9 – резистори

Q = 12 кг·1005 Дж/(кг·°C)·10°C = 120600 Дж

Охолоджувальна потужність елементів Пельтьє визначається за формулою:

$$Pcool = Pinput \cdot \eta, \quad (2)$$

де Pinput = U·I = 12 В·6 А = 72 Вт – споживана потужність одного елемента, η = 0,15 – коефіцієнт корисної дії.

Для одного елемента Pcool = 72 Вт·0,15 = 10,8 Вт, для двох елементів Pcool = 21,6 Вт.

Час охолодження визначається як:

$$t = Q/Pcool = 120600 \text{ Дж}/21{,}6 \text{ Вт} \approx 5583 \text{ с}$$

$$\approx 93 \text{ хв}$$

Експериментальні дослідження підтвердили теоретичні розрахунки. Кондиціонер продемонстрував стабільну роботу в усіх режимах, забезпечуючи зниження температури повітря в тестовому приміщенні відповідно до розрахункових параметрів.

Розроблений прототип [рис. 2] демонструє перспективність використання термоелектричних модулів Пельтьє в системах мікрокліматизації приміщень малого об'єму.

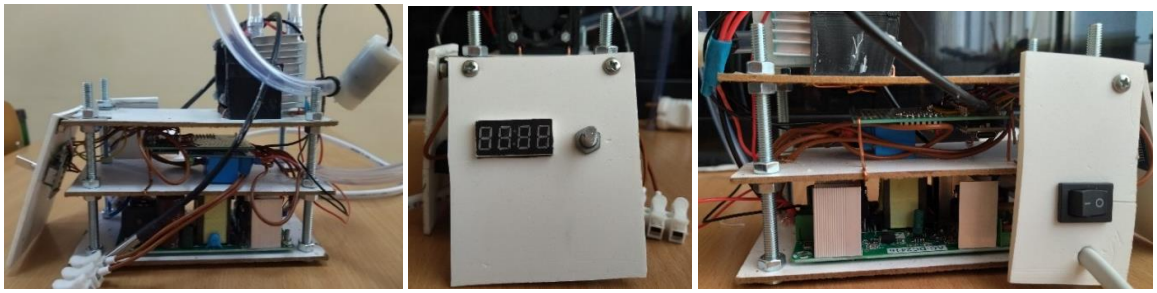


Рис. 2. Каркас розробленого прототипу

Подальший розвиток проєкту передбачає оптимізацію системи тепловідведення та вдосконалення алгоритмів керування для підвищення енергоефективності пристрою.

ПОСИЛАННЯ

1. Литвиненко С. С. Термоелектричні явища. Ефекти Зеєбека та Пельтьє. URL: https://www.inforum.in.ua/conferences/24/78/575 (дата звернення: 15.09.2024).
2. Скляр М. О., Олещук Л. М. Елементи Пельтьє: переваги, недоліки, сфери використання. Науково-технічна конференція молодих вчених та студентів, присвячена дню Науки. Секція «Машинобудування», підсекція «Лазерної техніки та фізико-технічних технологій»: тези доповідей, 2014 р., м. Київ. Київ: НТУУ «КПІ», 2014. С. 11–12. URL: https://ela.kpi.ua/items/9f05399a-c540-4d4a-b522-8aa1414e7ed6 (дата звернення: 17.11.2024).

УДК 699.8:620.9:691

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИБОРУ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ УКРИТТІВ З УРАХУВАННЯМ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ АСПЕКТІВ

В. О. Козова[1], О. В. Шандригіна[1]

[1]Комунальний заклад загальної середньої освіти
«Ліцей № 11 Хмельницької міської ради»
тел.: (096) 016-07-09, e-mail: lerakozova24@gmail.com

Під час розв'язання поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення фізичних властивостей будівельних матеріалів для будівництва укриттів, а також екологічність, економічність і доступність для масового виробництва.

Ключові слова: *довговічність, захисні споруди, конструкції, матеріали, міцність, оцінка, ефективність, екологічність, ударостійкість, укриття.*

OPTIMIZATION OF BUILDING MATERIALS FOR SHELTERS CONSIDERING ENVIRONMENTAL AND ENERGY EFFICIENCY ASPECTS

V. Kozova[1], O. Shandrygina[1]

[1]Municipal institution of general secondary education
"Lyceum № 11 of Khmelnytskyi City Council"
phone: (096) 016-07-09, e-mail: lerakozova24@gmail.com

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used, based on the study of the physical properties of building materials for the construction of shelters, as well as environmental friendliness, economic efficiency, and availability for mass production.

Key words: *durability, protective structures, constructions, materials, strength, assessment, efficiency, environmental friendliness, impact resistance, shelters.*

У зв'язку зі зростанням потреби в надійних захисних спорудах та актуалізацією використання відновлюваних енергоресурсів досліджено проблему оптимізації вибору будівельних матеріалів для таких об'єктів з урахуванням екологічної безпеки та енергоефективності. Проаналізовано існуючі рішення та запропоновано удосконалений підхід до застосування легких бетонів з базальтовою фіброю, мінеральної вати, вермикуліту та біополімерної гідроізоляції для підвищення експлуатаційних характеристик та екологічності укриттів.

Актуальність дослідження визначається дефіцитом енергоефективних та екологічно прийнятних захисних споруд у контексті розвитку відновлюваної енергетики. Метою роботи є оптимізація вибору будівельних матеріалів для укриттів на основі їхніх екологічних та енергоефективних властивостей. Проведено аналіз традиційних будівельних матеріалів та виявлено їхні обмеження щодо енергоефективності та екологічності. Запропоновано застосування легких бетонів, армованих базальтовою фіброю, з покращеними фізико-механічними характеристиками, а також теплоізоляційних матеріалів (мінеральна вата, вермикуліт) для підвищення енергоефективності укриттів. Обґрунтовано використання екологічно сумісної біополімерної гідроізоляції для забезпечення довговічності та стійкості конструкцій до зовнішніх впливів. Впровадження запропонованих матеріалів сприятиме підвищенню ефективності та безпеки будівництва захисних споруд у сучасних умовах.

Рекомендації щодо комбінації матеріалів для досягнення оптимального балансу між міцністю, екологічністю та економічною ефективністю під час будівництва укриттів:

1. Матеріали для армування. Базальтове армування є ефективним і безпечним рішенням для захисних укриттів. Воно поєднує високу міцність, стійкість до корозії, впливу вологи та температур. Довговічність і відсутність потреби в додатковому захисті роблять його економічно вигідним, незважаючи на більшу початкову вартість [1, 2].

2. Матеріали для теплоізоляції. Вибір залежить від потреб проєкту, бюджету та довговічності. Мінеральна вата підходить для економічності (з гідроізоляцією). Спучений вермикуліт – для звукоізоляції (з урахуванням осідання) [3, 4].

3. Матеріалів для гідроізоляції. Для захисних укриттів доцільніше використовувати біополімерну гідроізоляцію. Вона зможе забезпечити надійний захист на довгий строк, що підвищує економічну ефективність, а також є стійкішою до високих температур, деформацій (від ударної хвилі) та екологічною [5, 6].

Впровадження запропонованих матеріалів сприятиме підвищенню ефективності будівництва укриттів у сучасних умовах.

ПОСИЛАННЯ

1. Арматура для залізобетонних конструкцій. Термінологія, різновиди та особливості арматури для залізобетонних конструкцій – новий матеріал блогу Метінвест-СМЦ. URL:https://metinvest-smc.com/ua/articles/armatura-dlya-zalizobetonnix-konstrukcii-terminologiya-riznovidi-osoblivosti/
2. Фізико-механічні властивості легких і важких бетонів, армованих базальтовою фіброю. URL: https://arch-studies.com.ua/uk/journals/tom-10-1-2024/fiziko-mekhanichni-vlastivosti-legkikh-i-vazhkikh-betoniv-armovanikh-bazaltovoyu-fibroyu
3. ДСТУ-Н Б В.2.6-185:2012 Настанова з проектування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склоровінгу. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=29793
4. Мінеральна вата – матеріал для теплоізоляції і утеплення. URL: http://surl.li/araclu
5. Вермикуліт – технічні характеристики і властивості, плюси і мінуси матеріалу. URL: https://yak.koshachek.com/articles/vermikulit-tehnichni-harakteristiki-i-vlastivosti.html
6. Гідроізоляція захисних споруд цивільного захисту. URL: https://ns-plus.com.ua/2019/06/12/gidroizolyatsiya-zahysnyh-sporud-tsyvilnogo-zahystu/

УДК 620.92:662.63:628.477

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ДЕРЕВНОЇ БІОМАСИ В ТЕПЛОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ (НА ПРИКЛАДІ СМІЛЯНСЬКОЇ ТЕЦ)

М. В. Косенко[1], Л. М. Онученко[1]

[1]Навчально-виховний комплекс «Загальноосвітня школа І-ІІІ ступенів № 3-колегіум» Смілянської міської ради, вул. Соборна, 125, м. Сміла, Черкаська обл., 20700, Україна, тел.: (099) 198-11-41, e-mail: mk6575495@gmail.com

У роботі досліджено використання деревної біомаси як альтернативного палива на теплових електростанціях на прикладі Смілянської ТЕЦ. Розглянуто перспективи утилізації золи від спалювання біомаси як органо-мінерального добрива для сільського господарства, що сприяє створенню безвідходного виробництва. Проведено розрахунки економічної доцільності такого підходу та його екологічних переваг для регіону.

Ключові слова: *деревна біомаса, теплова електростанція, утилізація золи, органо-мінеральні добрива, безвідходне виробництво.*

ANALYSIS OF WOOD BIOMASS USAGE IN THERMAL POWER PLANTS (CASE STUDY OF SMILA TPP)

M. Kosenko[1], L. Onuchenko[1]

[1]Educational complex "Secondary school of I-III degrees № 3-Collegium" of Smila City Council, 125 Soborna str., Smila, Cherkasy region, Ukraine, 20700, phone: (099) 198-11-41, e-mail: mk6575495@gmail.com

The paper investigates the use of wood biomass as an alternative fuel in thermal power plants on the example of Smila TPP. The prospects of ash utilization from biomass combustion as an organo-mineral fertilizer for agriculture are considered, which contributes to the creation of waste-free production. Calculations of the economic feasibility of this approach and its environmental benefits for the region have been carried out.

Key words*: wood biomass, thermal power plant, ash utilization, organo-mineral fertilizers, waste-free production.*

З урахуванням безперервного росту потреб у сировині на сучасному етапі актуальним стає ресурсоощадне ставлення до природи. Утилізація відходів теплової енергетики має важливе значення для вирішення екологічних проблем та раціонального ресурсоспоживання. Важливим питанням в Україні є переробка відходів теплової енергетики. Одним зі шляхів вирішення цієї проблеми є використання та утилізація золи від котелень на деревній біомасі для виробництва органо-мінеральних добрив [1].

Біомаса як паливо впевнено посідає четверте місце після вугілля, природного газу та нафти у світі за обсягами виробництва та споживання енергії. Її частка в загальному постачанні первинної енергії сягає 10 %.

Деревне біопаливо є одним з основних джерел альтернативної енергії в Україні. Це створює передумови для розширення й використання біомаси в енергетичних цілях, зокрема для виробництва теплової енергії. Використання лісової біомаси сприяє заміщенню викопного палива, пом'якшенню наслідків зміни клімату та посиленню енергетичної безпеки країни. Лісова біомаса наразі вже заміщує близько 2,5 млрд м³ природного газу та скорочує викиди CO_2 на 1 млн т щорічно. Запас деревини в лісах станом на 2021 рік оцінюється в 2,3 млрд м³. Запас на 1 га становить у середньому 235 м³. За рік в лісах України в середньому приростає 35 млн м³ деревини.

Черкаська область є малозалісненою та лісодефіцитною. Площа лісів та інших лісовкритих площ області становить 16 % загальної площі, що значно нижче від оптимального показника. Для забезпечення збалансованості між лісосировинними запасами, обсягами лісокористування й екологічними вимогами потрібно 21-22 %.

Зацікавленість громад у впровадженні енергетичних систем на місцевому біопаливі сприятиме енергетичній незалежності регіону та створенню нових робочих місць. Використання біомаси в енергетичних цілях зменшить негативний вплив виробничої діяльності на навколишнє середовище, забезпечить економічний розвиток регіону.

Україна не має практики поводження з деревною золою, що відповідала б принципам безвідходного виробництва. Зола біомаси – це джерело поживних елементів, що мають бути повернені в ґрунт [2]. Повторне використання цього ресурсу має важливе значення, оскільки деревна зола містить мінеральні речовини, що можуть використовуватись як добрива та повертатись до природного кругообігу речовин.

Раціональним способом утилізації золи від спалювання біомаси є її використання як добрива в сільському господарстві. Так, на підприємстві «Смілаенергопромтранс» проведена робота з підготовки технічних умов на комплексне органомінеральне мікродобриво «Попілогумат». Однак залучення у виробничий процес вторинних ресурсів на сьогодні стримується економічними можливостями підприємства.

Гумінові речовини, що містяться в золі, можна переробляти на органо-мінеральні добрива. За рік на Смілянській ТЕЦ виробляється 1080 т золи, яка є потенційним добривом і може принести прибуток у 10 800 000 грн.

Придбавши лінію гранулювання для змішаної органічної та неорганічної сировини, відходів ТЕЦ, буде можливість не тільки переробляти відходи власного виробництва, а й переробляти відходи лісозаготівлі (гілки та листя) на гранули для виробництва електроенергії на ТЕЦ.

При цьому вирішуються відразу дві проблеми: утилізація промислових відходів (створення безвідходного виробництва) та підвищення родючості ґрунтів.

ПОСИЛАННЯ

1. Гелетуха Г. Г., Желєзна Т. А., Драгнєв С. В., Баштовий А. І. Перспективи використання біомаси від обрізки та видалення багаторічних сільськогосподарських насаджень для виробництва енергії в Україні. Промислова теплотехніка. 2018. Т. 40. № 1. С. 68–74.
2. Матвєєва І. В., Гроза В. А., Криворученко О. Ю. Застосування золи біомаси в якості сировини для виробництва комплексних органо-мінеральних добрив. Енергетика та автоматика. 2022. №1. С. 208–220.

УДК 621.311.243:711.553

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА КОМФОРТ SMART SUN BENCH

О. В. Шандригіна[1], С. В. Мамаєва[1]

[1]Комунальний заклад загальної середньої освіти «Ліцей № 11 Хмельницької міської ради»,
вул. Свободи, 2А, м. Хмельницький, 29000, Україна,
тел.: (067) 123-45-67, e-mail: shandrygina.oksana@gmail.com

У роботі досліджено концепцію та проєктування енергетично незалежного соціального об'єкта SMART SUN BENCH (SSB), що інтегрує сонячні панелі з міською інфраструктурою. Розглянуто аспекти енергетичної автономності, мультифункціональності, екологічності та соціальної значущості запропонованого рішення. Обґрунтовано переваги використання рухомих сонячних панелей для підвищення ефективності генерації енергії в міських умовах.

Ключові слова: *відновлювана енергетика, сонячні панелі, розумне місто, сталий розвиток, енергоефективність, міська інфраструктура.*

ENERGY EFFICIENCY AND COMFORT OF SMART SUN BENCH

O. Shandryhina[1], S. Mamaieva[1]

[1]Communal institution of general secondary education "Lyceum №11 of Khmelnytskyi City Council",
2A Svobody str., Khmelnytskyi, Ukraine, 29000,
phone: (067) 123-45-67, e-mail: shandrygina.oksana@gmail.com

The paper explores the concept and design of an energetically independent social object SMART SUN BENCH (SSB), which integrates solar panels into urban infrastructure. The aspects of energy autonomy, multifunctionality, environmental friendliness, and social significance of the proposed solution are considered. The advantages of using movable solar panels to increase the efficiency of energy generation in urban conditions are substantiated.

Key words: *renewable energy, solar panels, smart city, sustainable development, energy efficiency, urban infrastructure.*

З огляду на загострення глобальної енергетичної кризи та нагальну потребу в обмеженні антропогенного впливу на довкілля використання сонячної енергії як відновлюваного та екологічно чистого джерела енергії набуває особливої актуальності. Своєчасність дослідження важлива в умовах енергетичної нестабільності, зумовленої геополітичними факторами, зокрема російською військовою агресією проти України, що підкреслює необхідність диверсифікації джерел енергопостачання та забезпечення енергетичної незалежності та безпеки.

Лавки з інтегрованими сонячними панелями є інноваційним елементом сучасної міської інфраструктури, що сприяє екологізації урбаністичного простору та підвищенню якості життя міського населення. Концептуально такі об'єкти поєднують функції традиційних елементів міського благоустрою з сучасними технологічними рішеннями, спрямованими на генерацію відновлюваної енергії та забезпечення додаткових сервісів для користувачів.

Мета роботи: проєктування й теоретичне обґрунтування концептуального прототипу енергетично незалежного соціального об'єкта «SMART SUN BENCH» (SSB), інтегрованого з використанням сучасних технологічних рішень. Для реалізації поставленої мети здійснено критичний аналіз існуючих аналогів з метою виявлення їхніх переваг та недоліків.

Основними ідеями проєкту стали:

1. Енергетична автономність: створення SSB системи, яка повністю забезпечує себе енергією за рахунок сонячних батарей, зменшуючи залежність від традиційних джерел енергії.
2. Мультифункціональність: інтеграція різних функцій в один пристрій для підвищення зручності користувачів (безпровідна зарядка мобільних пристроїв, електросамокатів, Wi-Fi, освітлення, інфо-монітор, відеоспостереження, екстрений зв'язок).
3. Екологічність: використання екологічно чистих матеріалів і технологій для зменшення негативного впливу на довкілля.

4. Соціальна значущість: створення комфортного та безпечного функціонального простору для міських жителів, інтеграція з «розумним містом».
5. Економічна доцільність: розробка прототипу, який є економічно вигідним в довгостроковій перспективі, враховуючи економію на електроенергії та потенційні доходи від реклами на інфо-моніторі.

Технологічна новизна запропонованого прототипу SMART SUN BENCH полягає у використанні високоефективних рухомих сонячних панелей для забезпечення максимального виробництва енергії навіть в умовах обмеженого сонячного світла. Це дозволяє збільшити виробництво електроенергії на 15–50 % порівняно зі стаціонарними панелями та забезпечити більш рівномірне виробництво електроенергії протягом дня.

Сучасні трекерні системи, обладнані датчиками, здатні автоматично коригувати положення панелей, що унеможливлює втручання людини. Новітня система управління енергією оптимізує використання накопиченої енергії для забезпечення безперебійної роботи всіх функцій SSB за рахунок впровадження датчиків руху; сприяє децентралізації енергопостачання та зменшенню навантаження на централізовані мережі.

Модульність конструкції дає можливість легко змінювати та доповнювати функціонал SMART SUN BENCH залежно від потреб користувачів та специфіки місця встановлення. Запропонована модель SSB демонструє еволюцію від базових конструкцій «розумних» лавок з обмеженим функціоналом до комплексних рішень, інтегрованих у концепцію «розумного міста».

Оцінка ефективності SMART SUN BENCH показала, що застосування рухомих сонячних панелей дозволяє підвищити генерацію електроенергії вдвічі в порівнянні з фіксованими аналогами. Система здатна забезпечити до 6,08 кВт·год взимку та до 15,2 кВт·год влітку, що дозволяє повністю покрити потреби в енергії для всіх функцій. Завдяки використанню сонячної енергії, SSB може економити міський бюджет до 85 000–181 000 грн на рік на оплаті електроенергії. Крім того, інтеграція відеоспостереження та екстрених кнопок сприяє зниженню рівня злочинності на 10–20 % та підвищенню рівня безпеки громадян.

Таким чином, розроблений прототип SSB є перспективним рішенням для підвищення енергоефективності, екологізації та безпеки міського простору, сприяючи створенню комфортного і сталого середовища для міських жителів.

ПОСИЛАННЯ

1. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text (дата звернення: 15.04.2025).
2. Davis, M. & Butler, F. (2024). Solar-powered smart benches for smart cities: A comprehensive review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 79, 145–158.
3. Goel, S. & Sharma, R. (2023). Integration of renewable energy solutions in urban infrastructure. Journal of Urban Technology, 30(2), 89–103.
4. Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг. Звіт про результати діяльності НКРЕКП у 2023 році. URL: https://www.nerc.gov.ua/reports/2023 (дата звернення: 10.04.2025).
5. Дейнеко Л. В., Шелудько Е. І. Можливості використання сонячної енергії в міській інфраструктурі України. Економіка і прогнозування. 2023. № 3. С. 89–103.

УДК 338.012

ЕНЕРГЕТИЧНІ ІННОВАЦІЇ: МАЙБУТНЄ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

О. В. Мєщєрякова[1]

[1]Криворізький фаховий юридичний коледж Національного університету «Одеська юридична академія»
просп. Миру, 22, м. Кривий Ріг, Україна, 50074
тел.: (098)243-60-24, e-mail: oleksandram7@gmail.com

Розглянуто інноваційну складову розвитку енергетичного комплексу України, запропоновано можливі шляхи та напрями підвищення рівня енергетичної безпеки держави на основі співпраці з міжнародними партнерами.

***Ключові слова**: енергетичні інновації, енергетична безпека, відновлювана енергетика, водневі технології, «зелена» енергетика, фінансування.*

ENERGY INNOVATIONS: THE FUTURE OF RENEWABLE ENERGY AND HYDROGEN TECHNOLOGIES

O. Mieshchieriakova[1]

[1]Kryvyi Rih Professional Law College of the National University «Odesa Law Academy»
22 Myru Ave., Kryvyi Rih, Ukraine, 50074
tel.: (098)243-60-24, e-mail: oleksandram7@gmail.com

The innovative component of the development of Ukraine's energy complex is considered, possible ways and directions for increasing the level of energy security of the state are proposed on the basis of cooperation with international partners.

***Keywords**: energy innovations, energy security, renewable energy, hydrogen technologies, «green» energy, financing.*

У світі, де зміна клімату, геополітичні конфлікти, зростання населення й брак природних ресурсів викликають серйозні проблеми, енергетична безпека стає однією з найактуальніших проблем сучасності.

Повномасштабне вторгнення рф в Україну призвело до значних руйнувань у різних секторах, зокрема в енергетичному. Воєнні дії завдали серйозної шкоди енергетичній інфраструктурі, зокрема електростанціям, газопроводам та енергетичним мережам, що ускладнює постачання енергії та послуги для населення. Пошкодження інфраструктури й нестабільна ситуація в країні призводять до підвищення витрат на енергетичні ресурси та обслуговування. Війна створює проблеми з надійністю постачання енергії, що підвищує ризики для промислового виробництва та споживання населення.

Головна ідея [1]: відновлювана енергетика та водневі технології є стратегічними напрямами для енергетичної незалежності України, її сталого розвитку та інтеграції в європейський енергетичний простір. Завдяки значному природному потенціалу, інноваційним рішенням та міжнародному співробітництву Україна може стати ключовим виробником і експортером «зеленої» енергії та водню, що сприятиме економічному зростанню, декарбонізації та енергетичній безпеці країни. Глобальні виклики у сфері енергетики вимагають від держав і компаній швидких та ефективних рішень, що базуються на принципах сталого розвитку.

Україна може стати важливим гравцем у сфері відновлюваної енергетики та виробництва водню з огляду на свій природний потенціал і географічне розташування: має значний потенціал для розвитку відновлюваної енергетики. Сонячні та вітрові ресурси, а також біомаса можуть стати основою для енергетичної незалежності країни. Вже зараз в Україні реалізуються численні проєкти у сфері сонячної та вітрової енергетики, що сприяє залученню інвестицій.

З огляду на глобальні тренд, Україна також має потенціал для розвитку водневої економіки. Виробництво зеленого водню через електроліз з відновлювальної енергії може стати інструментом для зменшення енергетичної залежності та реалізації амбіцій України у сфері екології [2, 3].

Співпраця з європейськими та міжнародними партнерами у формуванні «зеленої» економіки може допомогти реалізувати амбіції з переходу до сталого розвитку.

Розвиток міжнародної співпраці, зокрема з країнами Європи, які активно переходять на водневі технології, здатний підтримати Україну в імплементації нових проєктів та залученні фінансування [4].

Глобальні виклики енергетичної безпеки вимагають активних і комплексних рішень. Перехід до сталого розвитку, використання відновлювальної енергетики та водневих технологій є ключовими напрямами для забезпечення енергетичної незалежності та зміцнення міжнародної позиції України на енергетичному ринку. Україна має всі шанси стати важливим гравцем у глобальній «зеленій» енергетиці, якщо зосередиться на розвитку інфраструктури, залученні інвестицій і впровадженні інноваційних технологій [5].

Отже, енергетичні виклики України вимагають термінових і скоординованих дій для забезпечення енергетичної безпеки та незалежності. Україна має великі можливості для переходу на відновлювані джерела енергії та розробки водневих технологій, які можуть стати наріжним каменем у досягненні екологічної стійкості та економічного відновлення. Завдяки інтеграції нових технологій та співпраці з міжнародними партнерами країна може впевнено рухатися в напрямі сталого розвитку та зменшення енергетичної залежності.

ПОСИЛАННЯ

1. Міністерство енергетики України: Офіційний сайт. Воднева стратегія України на період до 2050 року (проєкт). URL: https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf (дата звернення: 01.03.2025).
2. Савчук С. Чому Україна має стимулювати розвиток водню? *Економічна правда*, 18 травня 2020 р. URL: https://epravda.com.ua/projects/greendeal/2020/05/18/660480 (дата звернення: 09.03.2025).
3. Кудря С. О., Яценко Л. В., Шинкаренко Л. Я., Ткаленко М. Д. Електролітичне виробництво водню для вітроводневих станцій. *Відновлювана енергетика*. 2023. № 3. С. 92–100.
4. Воднева стратегія України: проєкт / Інститут відновлювальної енергетики НАН України. Київ, 2021. 91 с.
5. Мисків Г. В., Іваницький Р. Я. Зелений водень як основа для водневої економіки. Наукові інновації та передові технології. 2024. № 1(29). С. 508–519.

УДК 621.362.1

«МІНІПІЧ» – АВТОНОМНИЙ ГЕНЕРАТОР ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

М. С. Пасько[1], О. А. Коваленко[1], О. В. Козленко[2]

[1]Політехнічний ліцей НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського», Київ,
тел.: +380984697841, e-mail: maximpaskoserhi@gmail.com
[2]НТУУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, Київ, Україна

Анотація: *Робота присвячена розробці та практичній реалізації компактного автономного генератора електроенергії на основі ефекту Зеєбека з використанням доступних матеріалів як палива. Отримані результати підтверджують можливість його широкого застосування в умовах відсутності централізованого енергопостачання: у військових, туристичних чи екстремальних ситуаціях.*

Ключові слова: *термоелектричні явища, ефект Заєбека, модуль Пельтьє, автономний генератор електроенергії, альтернативна енергетика.*

“MINIFURNACE” – AUTONOMOUS ELECTRICITY GENERATOR

M. Pasko[1], O. Kovalenko[1], O. Kozlenko[2]

[1]Polytechnic Lyceum of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine
tel.: +380984697841, e-mail: maximpaskoserhi@gmail.com
[2]National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”,
37 Beresteiskyi prospect., Kyiv, Ukraine

Abstract: *The work is devoted to the development and practical implementation of a compact autonomous electricity generator based on the Seebeck effect, utilizing accessible materials as fuel. The obtained results confirm its potential for widespread use in conditions lacking centralized power supply, such as military, touristic, or extreme situations.*

Key words: *thermoelectric phenomena, Seebeck effect, Peltier module, autonomous generator, alternative energy.*

Однією з актуальних проблем сучасності є забезпечення автономними джерелами електроенергії. Це питання особливо загострюється в умовах нестачі централізованого електропостачання: на фронті, в екстремальних умовах, при природних катаклізмах, а також під час туризму і походів. Існуючі джерела, такі як сонячні панелі, вітрогенератори або ручні динамо-машини, мають обмеження через залежність від погодних умов чи фізичних зусиль користувача.

Саме тому особливої актуальності набувають автономні термоелектричні генератори [1], які можуть працювати за будь-яких погодних умов, використовуючи ефект Зеєбека для перетворення чистого тепла на електроенергію. Запропонована розробка − це компактний, мобільний та дешевий пристрій, що дозволяє генерувати електроенергію за допомогою доступного палива (відходи деревини, сухий спирт тощо). Такий пристрій стане незамінним як на передовій, так і в цивільному використанні для побутових потреб, відповідаючи концепції сталого енергозабезпечення та енергоефективності [2].

У межах роботи було створено діючий прототип автономного термоелектричного генератора «Мініпіч». Основу конструкції становлять два модулі Пельтьє, що перетворюють теплову енергію на електричну завдяки ефекту Заєбека (рис. 1, рис. 2). Корпус пристрою був виготовлений з недорогих і доступних матеріалів, що робить його простим у виготовленні, використанні та ремонті. Під час експериментального тестування розробленого генератора при температурній різниці близько 150 °C було отримано стабільну напругу близько 6 В, що є достатнім показником для ефективного заряджання портативних електронних пристроїв, наприклад рацій, смартфонів, ліхтариків тощо. Запропонована конструкція забезпечує автономність, незалежність від погодних умов, простоту, доступність виготовлення, можливість використання широкого спектру доступного палива, компактність та легкість транспортування (рис. 3).

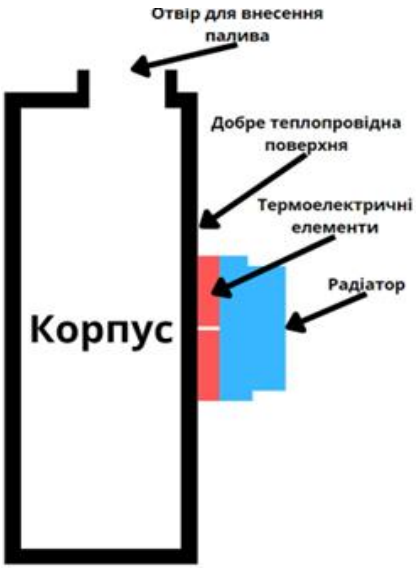


Рис. 1. Схема будови термогенератора «Мініпіч»

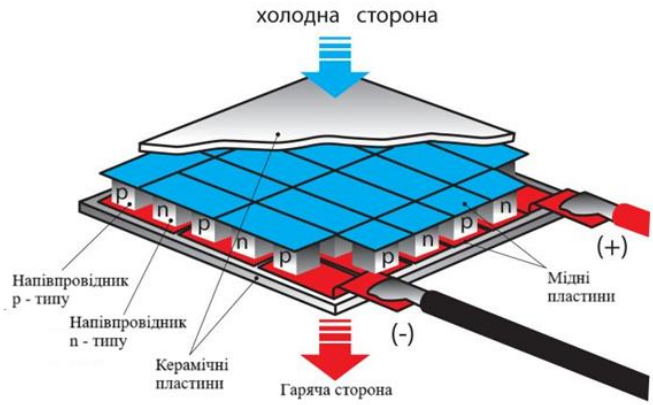


Рис. 2. Схема будови термоелектричного елемента

Рис. 3. Зображення прототипу термогенератора «Мініпіч»

Отже, запропонована розробка, демонструє практичну перспективність для забезпечення енергонезалежності у випадках відсутності централізованого енергопостачання, що може бути використано в польових умовах, туризмі та надзвичайних ситуаціях.

ПОСИЛАННЯ

1. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text (дата звернення: 14.03.2025).
2. Анатичук Л. І., Михайловський В. Я., Максимук М. В. Термоелектричні генератори для використання теплових відходів. Термоелектрика. 2021. № 2. С. 5−29. DOI: 10.15407/j.TE.2021.02.01

УДК 628.4.032

ПРОБЛЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ВІДХОДІВ НА ЛОКАЛЬНОМУ РІВНІ ТА ГЕОГРАФІЯ НЕСАНКЦІОНОВАНИХ СМІТТЄЗВАЛИЩ

***А. С. Піддубний*[1]**

[1]Комунальний заклад загальної середньої освіти ліцей № 3 Жовтоводської міської ради,
вул. І. Богуна, 50, м. Жовті Води, 52210, Україна,
тел.: (066) 424-87-66, e-mail: qra2351@gmail.com

У роботі досліджено проблему раціонального використання твердих побутових відходів на глобальному, регіональному та локальному рівнях, виявлено географію і склад несанкціонованих сміттєзвалищ у місті Жовті Води, обґрунтовано доцільність створення сміттєпереробного заводу для вирішення проблеми накопичення відходів та виробництва біогазу.

***Ключові слова**: тверді побутові відходи, несанкціоновані сміттєзвалища, переробка відходів, біогаз, екологічна безпека.*

WASTE DISPOSAL PROBLEMS AT THE LOCAL LEVEL AND GEOGRAPHY OF UNAUTHORIZED LANDFILLS

***A. Piddubnyi*[1]**

[1]Municipal institution of general secondary education Lyceum №3 of Zhovti Vody City Council,
50 I. Bohuna str., Zhovti Vody, Ukraine, 52210
phone: (066) 424-87-66, e-mail: qra2351@gmail.com

The paper investigates the problem of rational solid waste management at global, regional and local levels, reveals the geography and composition of unauthorized landfills in Zhovti Vody, substantiates the feasibility of creating a waste recycling plant to solve the problem of waste accumulation and biogas production.

***Key words:** solid waste, unauthorized landfills, waste recycling, biogas, environmental safety.*

Ситуація з твердими побутовими відходами (ТПВ) в Україні є критичною: сміттєзвалища переповнені, щороку утворюється десять мільйонів тонн ТПВ, рівень переробки низький − перероблюється лише 3 %, спалюється 2 %, а всі інші відходи захоронюються [1].

Під час дослідження було виявлено такі способи переробки ТПВ: спалювання, газифікація, гідрогеноліз, термічна обробка, метод піролізу, компостування, анаеробне розчеплення, біоенергетика, ферментація. З використанням сучасних технологій можна переробити майже будь-які відходи [2−5].

У процесі вивчення складу ТПВ у місті Жовті Води було встановлено, що відходи є цінним ресурсом, адже складаються з органічних відходів (93 %), пластику (4 %), паперу (3 %). За допомогою польового методу виявлено географію несанкціонованих сміттєзвалищ міста, виміряно їх площу (364,81 м²) та складено мапу (рис. 1, рис. 2). Визначено склад ТПВ на несанкціонованих сміттєзвалищах: листя – 69 %, гілки – 15 %, будівельні відходи – 6 %, пластик – 4 %, папір – 3 %, гума – 3 %.Виявлено, що актуальною проблемою в місті є переповнення полігону з 2021 року, проте щороку він наповнюється на 17854 т, негативно впливаючи на довкілля та здоров'я мешканців [6]. Аналіз поводження з ТПВ в країнах Європи показує, що європейські країни досягли значних результатів у переробці відходів: від 40 % (Польща) до 99 % (Швеція) [6, 7]. Важливо зазначити, що покращення екологічної ситуації є однією з умов вступу до ЄС.

Досліджуючи ситуацію в Дніпропетровській області, виявлено негативний вплив полігонів ТПВ на довкілля через виділення 13,8 млн м³ звалищного газу, що забруднює повітря, та 296 тис. м³ фільтрату, що потрапляє в ґрунтові та підземні води [8].

На основі аналізу об'єму та складу несанкціонованих сміттєзвалищ і накопичення ТПВ підтверджено гіпотезу про доцільність будівництва сміттєпереробного заводу в місті Жовті Води продуктивністю 15 000 т ТПВ на рік. Розраховано потенційну кількість біогазу – 4 500 000 м³, який можна виробити завдяки переробці органічних відходів, та кількість електроенергії – 49 770 000 кВт·год. За розрахунками, завод за рік вироблятиме енергії на суму 531 600 000 грн, а його окупність становитиме 2,4 року.

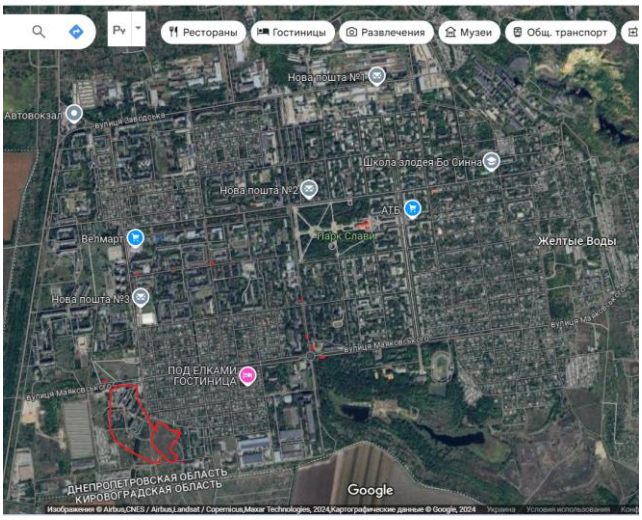


Рис. 1. Супутниковий знімок географії несанкціонованих сміттєзвалищ станом на 22.09.2024 (створено автором). Умовні позначення: червона лінія – межа несанкціонованих сміттєзвалищ

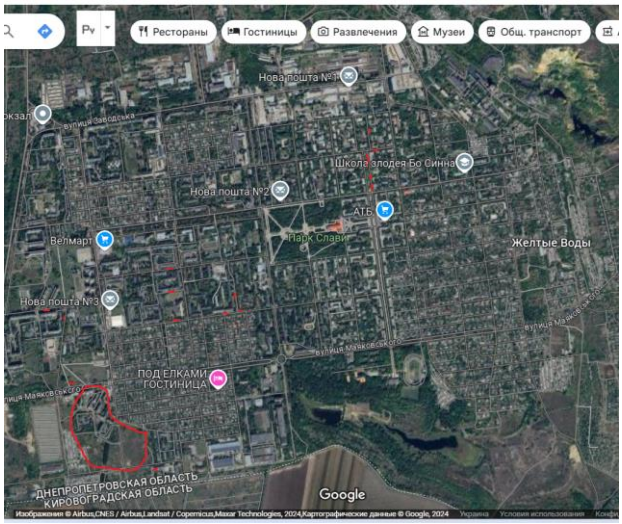


Рис. 2. Супутниковий знімок географії несанкціонованих сміттєзвалищ станом на 01.11.2024 (створено автором). Умовні позначення: червона лінія – межа несанкціонованих сміттєзвалищ

ПОСИЛАННЯ

1. Головне управління Держпродспоживслужби в Дніпропетровській області. Проблема сміття в Україні. URL: https://dp.dpss.gov.ua/news/problema-smittia-v-ukraini (дата звернення: 18.02.2025).
2. Muhammad Sajid Khan, Ishrat Mubeen, Yu Caimeng, Gaojun Zhu, Azeem Khalid, Mi Yan. Waste to energy incineration technology: Recent development under climate change scenarios. URL: https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0734242X221105411 (дата звернення: 12.03.2025).
3. Valentina Beghetto, Roberto Sole, Chiara Buranello, Marco Al-Abkal, Manuela Facchin. Recent Advancements in Plastic Packaging Recycling. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/14/17/4782 (дата звернення: 10.03.2025).
4. Juliana Vasco-Correa, Sami Khanal, Ashish Manandhar, Ajay Shah. Anaerobic digestion for bioenergy production: Global status, environmental and techno-economic implications, and government policies. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852417315456 (дата звернення: 08.03.2025).
5. Жовтоводська міська територіальна громада. Стратегія розвитку міста. URL: https://zhv.dp.gov.ua/ekonomika/strategiya-rozvitku-mista (дата звернення: 15.02.2025).
6. Наш вибір. Як правильно сортувати сміття у Польщі? URL: https://naszwybir.pl/sortuvaty-smittya-u-polshhi/ (дата звернення: 05.04.2025).
7. Швеція: країна, де немає сміття. URL: https://ecogrizzly.shop/country-without-garbage/ (дата звернення: 05.02.2025).
8. Agro Biogas. URL: https://agrobiogas.com.ua/more-energy-to-get-away-from-biogas/ (дата звернення: 10.02.2025).

УДК 553.493:620.9

ПОЛОХІВСЬКЕ РОДОВИЩЕ ЛІТІЄВИХ РУД ЯК ПЕРСПЕКТИВНЕ ДЖЕРЕЛО СИРОВИНИ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

І. Г. Плахін[1], Г. М. Башлик[1]

[1]Комунальний заклад загальної середньої освіти ліцей № 3 Жовтоводської міської ради,
вул. І. Богуна, 50, м. Жовті Води, 52210, Україна,
тел.: (099) 303-70-57, e-mail: ivanpla6b@gmail.com

У сучасному світі, де технології швидко розвиваються й попит на енергозберігаючі ресурси зростає, літій стає дедалі ціннішим металом. Структура попиту на ресурси зазнає поступових змін через технологічну революцію: нафтова й газова індустрії потерпають від виснаження ресурсів і поступово відходять на другий план, тоді як на літій, кобальт, нікель та інші метали, які використовують для впровадження нових енергоефективних технологій, привертають до себе все більшу увагу. Стаття присвячена аналізу потенціалу експлуатації Полохівського родовища з метою отримання сировини для забезпечення розвитку енергоефективних технологій в Україні.

Ключові слова: *літій, Полохівське родовище, енергоефективні технології, літій-іонні акумулятори, мінеральні ресурси.*

POLOKHIVSKE LITHIUM ORE DEPOSIT AS A PROMISING SOURCE OF RAW MATERIALS FOR THE DEVELOPMENT OF ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES

I. Plakhin[1], H. Bashlyk[1]

[1]Municipal institution of general secondary education Lyceum №3 of Zhovti Vody City Council,
50 I. Bohuna str., Zhovti Vody, Ukraine, 52210
phone: (099) 303-70-57, e-mail: ivanpla6b@gmail.com

In the modern world, where technologies are rapidly developing and the demand for energy-saving resources is accordingly increasing, lithium is becoming an increasingly valuable metal. The structure of resource demand is undergoing gradual changes due to the technological revolution: the oil and gas industries are suffering from resource depletion and are gradually receding into the background, while lithium, cobalt, nickel and other metals used for the implementation of new energy-efficient technologies are receiving increasing attention. The article is devoted to the analysis of the potential exploitation of the Polokhivske deposit in order to obtain raw materials for the development of energy-efficient technologies in Ukraine.

Key words: *lithium, Polokhivske deposit, energy-efficient technologies, lithium-ion batteries, mineral resources.*

Україна має потенціал як для задоволення власних потреб, так і для виходу на світовий ринок літію. Для цього в країні є розвідані перспективні родовища, а саме: Станкуватське та Полохівське в Кіровоградській області, Шевченківське в Донецькій області, Крута Балка в Запорізькій області [1]. У період повномасштабного вторгнення експлуатація родовищ Шевченківського та Крутої Балки неможлива через розташування на тимчасово окупованих територіях. Враховуючи ці обставини, особливий інтерес становить Полохівське родовище літію [1].

Полохівське родовище розташоване в Новоукраїнському районі Кіровоградської області, східній частині Шполянo-Ташлицького рідкіснометалічного рудного району. У рідкіснометальних пегматитах родовищ, крім літію, виявлено тантал, ніобій, рубідій, цезій, олово, берилій [2]. Державним балансом запасів корисних копалин України обліковуються чотири родовища − Шевченківське родовище сподуменових руд, Полохівське родовище петалітових руд, Станкуватське родовище та родовище Крута Балка сподумен-петалітових руд [3].

Оскільки Полохівське родовище літієвих руд складене пегматитами, це дозволяє отримувати з руди концентрат екологічно чистим шляхом, гравітаційним збагаченням, на відміну від флотації, яка потребує залучення великих площ для створення хвостосховищ та значних капіталовкладень для створення й роботи збагачувальної фабрики. Основний мінерал в літієвій руді Полохівського родовища − петаліт, особливість якого полягає у відсутності домішок, що доводить доцільність гравітаційного збагачення [4].

Для видобутку руди літію пропонується прокладання підземної виробки довжиною 12 км від Смолінської шахти до нижніх рудних пластів Полохівського родовища. Така технологія розкриття й видобутку вже існує на базі Інгульської шахти [5]. Вона набагато дешевша за побудову нової шахти безпосередньо на території родовища, забезпечить збереження родючого шару ґрунту та дозволить залучити працересурсний потенціал, що утворився після зупинки Смолінської шахти. Також під час буріння тунелю стане можливим допрацювати залишки уранової руди в шахті, що має посилити енергетичну безпеку України.

Задля розвитку енергоефективних технологій виробництва літій-іонних акумуляторів на сировині Полохівського родовища пропонується розташувати в Україні відповідне виробництво літій-іонних акумуляторів разом з підприємством, що спеціалізуватиметься на збиранні електромобілів. Така ініціатива є можливою в кооперації з транснаціональними корпораціями в галузі автомобілебудування, враховуючи досвід співпраці ПрАТ «Єврокар» зі Škoda Auto a.s. [6]. Розвиток енергоефективних технологій забезпечить нові робочі місця, потік інвестицій в Україну та покращення економічного становища в регіоні видобутку літію. Разом усе це може стати метою післявоєнного розвитку енегроефективних технологій та економіки України.

ПОСИЛАННЯ

1. Іванов Є. Географія мінеральних ресурсів України: монографія / Мирослав Сивий, Ігор Паранько, Євген Іванов. Львів: Простір М, 2013.
2. Грінченко О. В., Курило М. В., Михайлов В. А., Михайлова Л. С., Огар В. В., Омельчук О. В., Шевченко В. І., Шунько В. В., Щербак Д. М. Металічні корисні копалини України. С. 179−187.
3. Яцков М. В., Корчик Н. М., Кирилюк С. В., Пророк О. А. Добування літію із природних, промислових та стічних вод. Вісник Національного університету водного господарства та природокористування.
4. Хмелюк Т. С. Методи збагачення руд. URL: https://eztuir.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/73/25.pdf (дата звернення: 15.03.2025).
5. Кваліфікаційна робота бакалавра на тему: Сучасний гідроекологічний стан р. Інгул в пункті с. Софіївка за період 2010-2021 рр. С. 33. URL: http://eprints.library.odeku.edu.ua/id/eprint/10373/1/Яров+Минюк_КРБ(2022).pdf (дата звернення: 10.03.2025).
6. ПрАТ «Єврокар» на сайті Skoda. URL: https://www.skoda-auto.ua/company/skoda-prat-eurocar (дата звернення: 12.03.2025).

УДК 620.952:631.95

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ НЕЗАДІЯНИХ ЗЕМЕЛЬ У КИЇВСЬКІЙ ОБЛАСТІ ДЛЯ НАСАДЖЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ КУЛЬТУР

В. М. Савенков[1], О. С. Назаренко[2]

Лисичанський ліцей № 17 Сєвєродонецького району Луганської обл., вул. Могилевська, 5, м. Лисичанськ, 93100, Україна, тел.: (050) 078-94-29, e-mail: vladsavenkov1208@gmail.com

[2]Комунальний заклад «Луганська обласна мала академія наук учнівської молоді», вул. Менделєєва, 1, м. Рубіжне, 93000, Україна

Будівництво біотеплоелектроцентралей (біоТЕЦ) є одним із перспективних шляхів вирішення наявних проблем енергозабезпечення в Україні. Вирощування енергетичних культур на незадіяних землях дозволяє забезпечити біоТЕЦ доступною та дешевою сировиною. У роботі проведено аналіз незадіяних земель Київської області для визначення їх придатності до вирощування енергетичних культур. За допомогою програми BIOPLAT-EU web GIS визначено 10 ділянок загальною площею 1314 га у чотирьох районах області. На основі досліджень рельєфу, вологості, кількості опадів та температурних умов ділянок вибрано енергетичну тополю як оптимальну культуру для вирощування на виявлених територіях.

Ключові слова: *енергетичні культури, біотеплоелектроцентраль, незадіяні землі, тополя, дистанційне зондування Землі.*

ANALYSIS OF THE POTENTIAL OF UNUSED LANDS IN KYIV REGION FOR PLANTING ENERGY CROPS

V. Savenkov[1], O. Nazarenko[2]

[1]Lysychansk Lyceum No. 17 of Sievierodonetsk District of Luhansk Region, 5 Mohylevska str., Lysychansk, Ukraine, 93100 phone: (050) 078-94-29, e-mail: vladsavenkov1208@gmail.com

[2]Municipal Institution "Luhansk Regional Junior Academy of Sciences of Student Youth", 1 Mendeleeva str., Rubizhne, Ukraine, 93000

Construction of bio-thermal power plants (bioTPPs) is one of the promising ways to solve existing energy supply problems in Ukraine. Growing energy crops on unused lands allows providing bioTPPs with affordable and cheap raw materials. The paper analyzes unused lands in Kyiv region to determine their suitability for growing energy crops. Using the BIOPLAT-EU web GIS program, 10 plots with a total area of 1314 hectares were identified in four districts of the region. Based on studies of relief, humidity, precipitation, and temperature conditions of the sites, energy poplar was selected as the optimal crop for cultivation in the identified territories.

Key words: *energy crops, bio-thermal power plant, unused lands, poplar, Earth remote sensing.*

Під час виконання роботи використовували літературні, картографічні дані, супутникові знімки ресурсів Google Earth Pro, EO Browser [1]. Як паливо на біоТЕЦ використовують енергетичні культури, які спеціально вирощують на землях, не придатних для вирощування сільськогосподарських культур. Для пошуку таких земель у роботі використовували програму BIOPLAT-EU web GIS інструмент. У чотирьох районах Київської області знайдено 10 ділянок земель, загальною площею 1314 га (табл. 1).

Таблиця 1. Дані про ділянки незадіяних земель

Назва району	Сумарна площа ділянок, га	Річна кількість опадів, 2023 р. мм	Вологість за значенням індексу NDMI (травень–серпень 2024 р)	Середня / максимальна температура в травні–серпні 2024 р.	Енергія з ділянок, МВт
Бучанський	161	650	0,02–0,04	30,6/41	17,18
Вишгородський	686	662	0,03–0,08	34,5/45	73
Обухівський	159	612	0,247	31,5/36	16,8
Фастівський	308	624	0,09	35,4/45	32,8

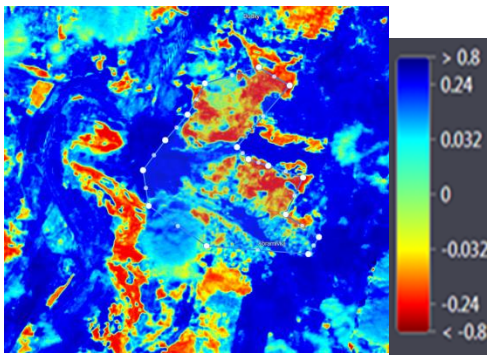


Рис. 1. Супутниковий знімок ділянки біля села Абрамівка Бучанського району, площа 162 га, 8.09.2024, візуалізація індекс NDMI, ресурс EO Browser

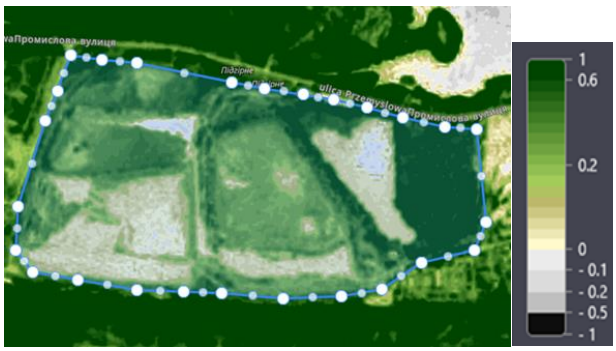


Рис. 2. Супутниковий знімок території золошлаковідвалу Трипільської ТЕС, площа 130 га, візуалізація індекс NDVI, ресурс EO Browser

Середні температури ґрунтів досліджених ділянок влітку становлять 30−35 °С градусів, максимальні − 42−46 °С. У вегетаційний період 2023 року випало від 29,4 до 32 % річної кількості опадів. Недостатня кількість опадів влітку та високі температури приводять до осушення територій досліджених ділянок. На основі вищенаведених даних на досліджених ділянках для насадження вибрано тополю, яка вимагає меншої кількості води в порівнянні з вербою, може рости на бідних та забруднених ґрунтах [2].

Також доцільно вирощувати енергетичну тополю на золошлаковідвалі Трипільської ТЕС (Обухівський район), площа якого становить 130 га. Дослідження показали, що перша секція відвалу природним чином заросла деревами (тополі, клени), індекс рослинності NDVI 0,8 одиниць (рис. 2). З насаджень тополі на золошлаковідвалі можна отримати 13,9 МВт енергії раз на 2-3 роки. Розрахунки показали, що в разі цілодобової роботи біоТЕЦ (8760 годин у рік) річний збір деревини на досліджених ділянках дозволить отримати у Бучанському районі 17,18 МВт, у Вишгородському районі − 73 МВт, в Обухівському районі − 16,8 МВт, у Фастівському районі − 32,8 МВт енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Робочий зошит з основ дистанційного зондування Землі. Частина 1 / С. М. Бабійчук, Л. Я. Юрків, О. В. Томченко та ін. 2-ге вид., доповн. і переробл. Київ: Національний центр «Мала академія наук України», 2023. 152 с. URL: https://api.man.gov.ua/api/assets/man/d6ff7382-de8a-421a-86a8-b7ed93303deb/
2. Економічна доцільність виробництва твердого біопалива з енергетичних культур в Україні: колект. моногр. / [Кизим М. О., Хаустова В. Є., Костенко Д. М., Котляров Є. І., Салашенко Т. І., Губарєва І. О.]. Харків: ФОП Лібуркіна Л М., 2023. 242 с. URL: https://ndcipr.org/media/publications/files/Mono_Solid_biofuels_energy_crops_2023.pdf

УДК 621.311.243

ДОСЛІДЖЕННЯ АКУМУЛЯЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

М. А. Синявський[1], В. О. Єрмоленко[2]

[1]Центр науково-технічної творчості Білоцерківської міської ради,
09107, вул. Софії Русової, 3А, м. Біла Церква, Київська обл., Україна,
тел: +38(0 96) 875 58 38, e-mail: maksbc2007@gmail.com

Дослідницьку роботу присвячено одному з актуальних питань акумуляції водню з використанням для промислових і побутових теплових потреб. Було вивчено та проаналізовано відповідні наукові публікації; визначено основні показники, що впливають на ефективність роботи сонячної батареї. Внаслідок проведення науково-дослідницької роботи були розроблені рекомендації щодо використання водню як альтернативи природному газу.

Ключові слова: *акумулятори, акумуляція водню, акумуляція сонячної енергії, водень, геліоенергетика, ефективність, сонячні батареї, сонячна енергетика, типи сонячних батарей.*

RESEARCH ON SOLAR ENERGY ACCUMULATION

M. Synyavsky[1], V. Ermolenko[2]

[1]Center for Scientific and Technical Creativity of the Bila Tserkva City Council,
09107, 3A Sofia Rusova str., Bila Tserkva, Kyiv Oblast, Ukraine,
tel: +38(0 96) 875 58 38, e-mail: maksbc2007@gmail.com

The research work is devoted to one of the topical issues of hydrogen accumulation with use for thermal needs: both industrial and domestic. Relevant scientific publications were studied and analyzed; the main indicators that affect the efficiency of the solar battery were determined. As a result of the research work, recommendations were developed on the use of hydrogen as an alternative to natural gas.

Key words: *batteries, hydrogen storage, solar energy storage, hydrogen, solar energy, efficiency, solar panels, solar energy, types of solar panels.*

ORCID: [1]0009-0008-8278- 414X; [2]0009-0002-7817-2657

Сонячна енергетика є одним з найбільш екологічно чистих варіантів виробництва енергії, яка успішно конкурує з традиційними видами отримання енергії та тепла – тепловими електростанціями, що використовують як паливо корисні копалини нашої планети. Сонячна енергія має величезний потенціал, який перевищує енергію всіх світових запасів викопних ресурсів. Так, обсяг енергії, отриманої від Сонця за 22 дні сонячної активності, рівноцінний усім запасам органічного палива на Землі. Тому актуальність дослідження визначається підвищеним інтересом до використання ефективного фотоенергетичного обладнання – сонячних батарей [1].

Сонячна енергетика (геліоенергетика – альтернативна назва) заснована на перетворенні прямого сонячного випромінювання на теплову та електричну енергію.

Сучасна сонячна енергетика поділяється на дві галузі: геліотермальну та фотовольтаїку (photovoltaics). Остання є більш цікавою й поширеною, особливо зараз, під час воєнного стану, коли відбувається постійне відключення електроенергії [2, 3].

Попри існування низки недоліків, переваг від процесу отримання сонячної електроенергії значно більше. Це не залишилося поза увагою світових виробників сучасних технологій. На сьогодні у світі існує близько 700 компаній – виробників сонячних панелей для промислового й побутового секторів [4].

Сонячні батареї є чудовим джерелом енергії, але вони мають великий недолік – їх генерація не постійна. Тому важливо мати додаткове джерело енергії в часи слабкої генерації або акумулювати енергію, коли її багато, для пізнішого використання. З цим нам допоможуть теплові насоси, генератори водню та акумулятори [5].

Найперспективнішим, але й найбільш енергоємним, є метод отримання водню з води шляхом електролізу. Щоб отримати кілограм водню таким методом, знадобиться 35 кВт/год електроенергії. Слід зауважити, що практично

на забезпечення тепла у квартирі витрати становлять від 4,5 до 5,14 Гкал, а вартість тепла в опалювальний сезон – від 6900 до 7900 грн, це за ціни тепла 1550 грн/Гкал.

Власні розрахунки виробництва сонячної енергії протягом року, з яких випливає, що у період квітень–жовтень сонячної енергії виробляється до 70 %. Вона може ефективно використовуватись для генерації водню, як альтернативного джерела для опалювання приміщення.

Нижче наведений розрахунок ціни водню (власні розрахунки):

1. Опалювальна площа = 47,2 м^2.

2. Витрати на тепло = 8790 грн/сезон.

3. Витрати на виробництво газу = 7250 грн/сезон.

4. Вартість 1 м^3 газу = 7,95 грн/м^3.

5. Витрати природного газу = 7250/7,95 = 911,94 м^3/сезон.

6. Перерахунок на використання енергії для опалювання = 911,94 * 39,8 = 36295,21 мДж/сезон.

7. Перерахунок на кількість потрібного водню = 36295,21:120 = 302,46 кг/сезон.

8. Ціна водню = 392,46 * 2,6 = 786,39 дол./сезон.

9. Ціна газу = 7250: 42 = 302 дол./сезон.

Відношення цін 786,39/302 = 2,6 – у стільки разів водень дорожчий від газу.

Провівши експериментальні дослідження дійшли висновку, що використання згенерованого водню в рідкому стані для виробництва тепла є перспективним напрямом розробки відповідних технологій.

Як показують дослідження, вартість виробництва рідкого водню для тепломереж у 2-3 рази вища від вартості використання природного газу. Тому науковцям і практикам потрібно спрямувати свої зусилля на удосконалення технологічного процесу виробництва рідкого водню та його накопичення в газові балони. Якщо розглядати процес генерації водню, то існуючі водневі генератори нараз, не відповідають техніко-економічним вимогам. Отже, провівши аналіз експериментальних досліджень, з'ясували, що, удосконалюючи технологію й обладнання для генерації рідкого водню, використовуючи сонячну енергію, можна досягнути ефективного використання цієї технології для автономного забезпечення теплових мереж теплом, відмовившись від використання природного газу, вартість якого щороку зростатиме.

ПОСИЛАННЯ

1. Вдовіченко К. В. Вплив оптичного випромінювання на вихідні характеристики сонячних елементів. 2019. 57 с. URL: https://cutt.ly/iMJQM1v
2. Інсоляція: вплив на виробництво електроенергії сонячними панелями / Статті. Solar Garden. URL: https://cutt.ly/QMJxg80
3. Кожем'яков В. П., Домбровський О. І., Жердецький В. Ф. та ін. Аналітичний огляд сучасних технологій фотоелектричних перетворювачів для сонячної енергетики. 239-Текстстатті-238-1-10-20151105.pdf. URL: https://cutt.ly/wMJj8iz
4. Колмиков М. О. «Пристрій та модель оцінювання ефективності сонячної панелі на основі поглинаючого шару NiO». Реферат // Veremiyenko_bac_rob.pdf. URL: https://cutt.ly/dMJoGFK
5. Колонтаєвський Ю. П., Тугай Д. В., Котелевець С. В. Фотоенергетика: навч. посібник. Харків: Нац. ун-т міськ. госпва ім. О. М. Бекетова, 2019. 160 с. URL: https://cutt.ly/KMH5tw8

УДК 621.548

СТВОРЕННЯ МОДЕЛІ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЇЇ ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ

***А. Г. Ясінський*[1]**

[1]Кам'янець-Подільська гімназія № 1 Кам'янець-Подільської міської ради Хмельницької обл., вул. Польський ринок, 6а, м. Кам'янець-Подільський, 32301, Україна, тел.: +38(097) 713-35-58, e-mail: kpschool1site@gmail.com

У роботі представлено розробку та дослідження моделі вітроенергетичної установки вертикально-осьового типу. Проаналізовано залежність швидкості вітру від висоти розташування установки та її вплив на продуктивність системи. На основі експериментальних даних досліджено залежність напруги генератора від швидкості вітру. Запропонована модель є енергоефективною, простою в обслуговуванні й може бути використана для енергозабезпечення приватних будинків.

Ключові слова: *альтернативні джерела енергії, вітроенергетична установка, генератор, вітроенергетичний потенціал, вітровий потік.*

CREATION OF WIND POWER PLANT MODEL AND RESEARCH OF ITS OPERATION PARAMETERS

***A. Yasinskyi*[1]**

[1]Kamianets-Podilskyi Gymnasium №1 of Kamianets-Podilskyi City Council of Khmelnytskyi Region, 6 "a" Polskyi Rynok str., Kamianets-Podilskyi, 32301, Ukraine, phone: +38(097) 713-35-58, e-mail: kpschool1site@gmail.com

This paper presents the development and research of a vertical-axis wind power plant model. The relationship between wind speed and installation height and its impact on system performance has been analyzed. Based on experimental data, the dependence of generator voltage on wind speed was investigated. The proposed model is energy efficient, easy to maintain, and can be used for energy supply of private houses.

Key words: *alternative energy sources, wind power plant, generator, wind energy potential, wind flow.*

Потенціал вітрової енергії, який може бути використаний до 2030 року, оцінюється в 16 ГВт, причому щорічно можна виробляти від 25 до 30 ТВт·год електроенергії. Крім того, Агентство з питань забезпечення ефективного використання енергетичних ресурсів вважає, що до 2050 року може використовуватись до 30 ТВт·год вітрової енергії, тоді як загальний технічний потенціал вітрової енергії становитиме 42 ТВт·год. В українській Енергетичній стратегії планується, що до 2030 року в Україні 2 ТВт·год електроенергії будуть вироблятися вітровими установками [1].

Оскільки швидкість вітру змінюється в різні час доби, різні місяці й сезони, під час вибору місця розміщення вітростанції, аеродинамічних розрахунків ВЕУ, проєктування механізмів, їх регулювання й орієнтації розглядають графіки добового, місячного й сезонного розподілу швидкостей [2]. Дані про середньорічні швидкості вітру слугують вихідною характеристикою загального рівня інтенсивності вітру. За величиною середньорічної швидкості вітру в першому наближенні можна судити про перспективність застосування вітроенергетичних установок у певному районі [3]. Вітровий потік, зустрічаючи при русі на своєму шляху лопаті, віддає свою енергію вітроколесу. Внаслідок наявності аеродинамічних втрат вітроколесо використовує тільки частину потужності вітрового потоку. Середня швидкість вітру за вибраний проміжок часу визначається відношенням суми виміряних значень миттєвої швидкості до числа вимірювань:

$$v_{\text{сер}} = \frac{v_1 + v_2 + \cdots + v_n}{n}. \quad (1)$$

За офіційними даними інформаційного сайту «Метеопост», середня швидкість вітру за 2021–2023 роки в м. Кам'янець-Подільському становила: 2021 р. → v_сер = 2,32 (м/с); 2022 р. → v_сер = 2,37 (м/с); 2023 р. → v_сер = 2,32 (м/с).

Але це лише значення вітру біля землі. Енергетичні установки використовують вітер на висоті до 50–70 м від поверхні землі, тому необхідно враховувати характеристики повітряних потоків саме на потрібних нам висотах (рис. 1). Зі збільшенням висоти зростає й швидкість вітру. Створену нами модель вітроенергетичної установки, планується

використовувати не тільки біля землі, а й на дахах та балконах будинків, тому необхідно розрахувати швидкість вітру на різних висотах. Зробити це можна за формулою [5]:

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\alpha} \quad (2)$$

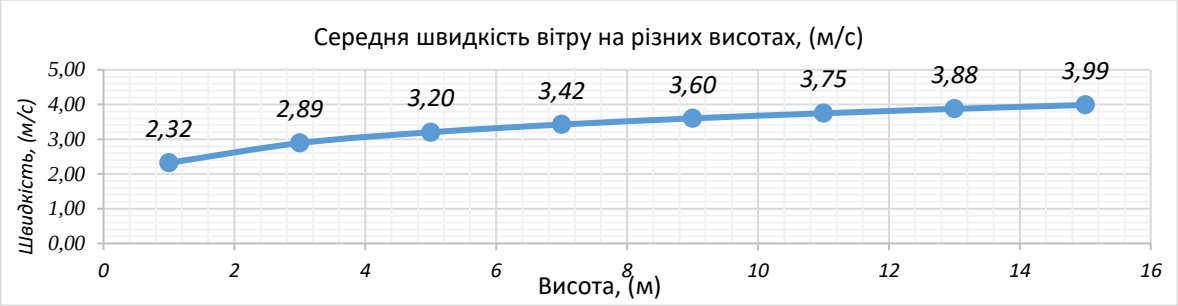


Рис. 1. Графік залежності швидкості вітру від висоти

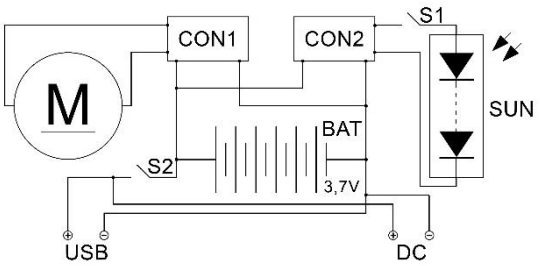


Рис. 2. Електрична схема вітрогенератора

Розроблена вітроелектроустановка вертикально-осьового типу проста й надійна в обслуговуванні та ремонті обладнання. Джерелом електроенергії слугує генератор у вигляді колекторного електродвигуна з постійним струмом (рис. 2). Цей двигун має змогу плавно змінювати швидкість обертання приводу та його валу, завдяки чому вони є дуже поширеними [7]. Джерелом механічної енергії для генератора є вітер; графік залежності напруги на затискачах генератора від швидкості вітру наведено на рис. 3.

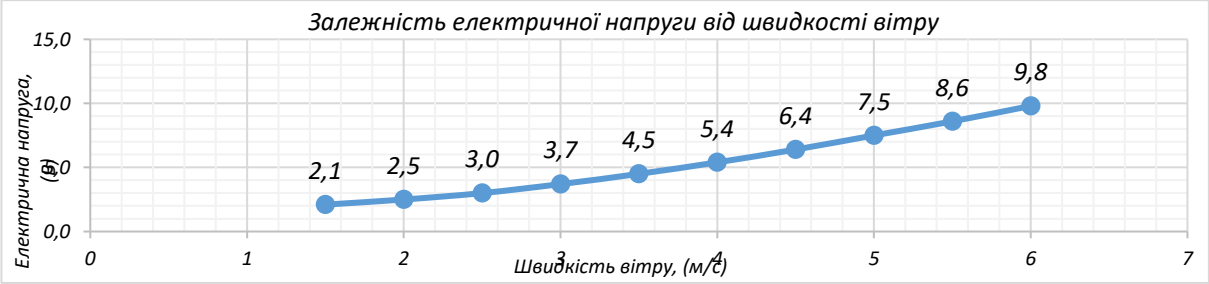


Рис. 3. Графік залежність електричної напруги від швидкості вітру

Побудована модель вітроенергетичної установки, яка в процесі випробувань довела свою ефективність. Електротехнічні рішення у цій установці дозволяють підтримувати раціональні режими роботи пристрою. Водночас запропоноване технічне рішення просте й може бути застосоване в інших типах вітрогенераторів.

ПОСИЛАННЯ

1. Звіт Української Вітроенергетичної асоціації «Вітроенергетичний сектор Україні 2023». Режим доступу: http://www.uwea.com.ua/.
2. Основи вітроенергетики: підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. Д.: НГУ, 2015. 335 с.
3. Альтернативні джерела енергії. Енергія вітру: навч. посіб. / С. В. Сиротюк, В. М. Боярчук, В. П. Гальчак. Львів : «Магнолія 2006», 2018. 182 с.

УДК 621.319.4

СТВОРЕННЯ ПОРТАТИВНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ НА ОСНОВІ АКУМУЛЯТОРІВ І СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЙОГО ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ

М. С. Хижняк[1]

[1]Кам'янець-Подільська гімназія № 1 Кам'янець-Подільської міської ради Хмельницької обл., вул. Польський ринок, 6а, м. Кам'янець-Подільський, 32301, Україна, тел.: +38(097) 713-35-58, e-mail: physicisscool@gmail.com

Суперконденсатори є перспективними енергонакопичувальними пристроями завдяки високій швидкості заряду / розряду та довговічності. У процесі роботи створено портативне джерело енергії на основі акумуляторів і суперконденсаторів з використанням вуглецевих електродів на основі активованого вугілля, графіту й полівінілацетату. Досліджено внутрішній опір, електроємність і коефіцієнт корисної дії за допомогою методу розряду через резистор. Отримані результати підтверджують придатність розробленої системи для застосувань із короткотривалими енергетичними циклами.

Ключові слова: *суперконденсатор, енергонакопичувач, внутрішній опір, електроємність, вуглецевий матеріал.*

CREATION OF A PORTABLE ENERGY SOURCE BASED ON BATTERIES AND SUPERCAPACITORS AND RESEARCH OF ITS OPERATING PARAMETERS

M. Khyzhniak[1]

[1]Kamianets-Podilskyi Gymnasium No. 1 of Kamianets-Podilskyi City Council of Khmelnytskyi Region, 6a Polskyi Rynok str., Kamianets-Podilskyi, Ukraine, 32301 phone: +38(097) 713-35-58, e-mail: physicisscool@gmail.com

Supercapacitors are promising energy storage devices due to their high charge/discharge rates and durability. This work develops a portable power source based on batteries and supercapacitors using carbon electrodes made from activated carbon, graphite, and polyvinyl acetate. The internal resistance, capacitance, and efficiency were studied using the resistor discharge method. The results confirm the suitability of the developed system for applications requiring short-term energy cycles.

Key words: *supercapacitor, energy storage, internal resistance, capacitance, carbon material.*

Суперконденсатори – перезаряджувані джерела живлення, які за своїми питомими параметрами посідають проміжне місце між акумуляторами та конденсаторами. Вони можуть накопичувати значну кількість електричної енергії, а в разі необхідності віддавати її на зовнішнє навантаження у вигляді імпульсів тривалістю до декількох секунд з питомою потужністю в кілька кіловат на кілограм [1]. Крім того, значення ефективності передачі енергії становить щонайменше 90 %. Енергонакопичувальні пристрої на основі суперконденсаторів можуть працювати в широкому діапазоні температур і не бояться короткого замикання. Також можуть працювати автономно протягом декількох років і не вимагають технічного обслуговування в процесі експлуатації. Суперконденсатори здатні витримати більше 510 циклів заряду / розряду без істотної зміни параметрів. Саме завдяки таким параметрам вони викликають інтерес у дослідників.

Важливим параметром, що впливає на електричні характеристики суперконденсатора, є гранулометричний склад пористого вуглецевого матеріалу, що використовується для виготовлення електродів [2].

Вуглецевмісна складова електродів виготовлялася з суміші, в яку входять:

- активований вуглецевий матеріал (березове активоване вугілля БАУ, 78 мас.%);
- струмопровідний графіт (щітки електродвигунів, 15 мас.%);
- зв'язувальне (полівінілацетат (ПВА), 7 мас.%).

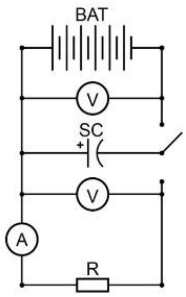


Рис. 1. Схема розряду через опір

Всі перераховані компоненти поміщалися в 20%-й розчин етилового спирту (96 %) та дистильованої води й ретельно перемішувалися. Потім отриману суспензію переносили в агатову ступку й ретельно розтирали до тістоподібного стану. На останній стадії методом вальцювання виготовляли вуглецевмісні складові електродів. Як робочий електрод використовували Al фольгу марки А97 товщиною 40 мкм та Al пластину для сублімації товщиною 250 мкм. Площа їх робочої поверхні становила 500 см² (2 шт.) та 28 см² (8 шт.). Для дослідження принципів роботи суперконденсаторів було створено дві моделі. Технологія виготовлення всіх електродів була ідентична, всі використані матеріали та реактиви були однакові. Лише фізичні моделі були різні. Визначення внутрішнього опору суперконденсатора є важливим для оцінки його ефективності. Це можна зробити кількома методами, залежно від обладнання та необхідної точності [3]. Ми використали метод розряду через опір. За схемою (рис. 1) зарядили суперконденсатор до напруги 1,8 В і підключили резистор з опором 100 Ом як навантаження. Вимірювання падіння напруги на суперконденсаторі в момент підключення (миттєве падіння – наслідок ESR) було здійснено за допомогою вольтметрів [4]. Коефіцієнт корисної дії (ККД) суперконденсатора визначає, наскільки ефективно він зберігає та передає енергію під час зарядки та розрядки. У промислових суперконденсаторів ККД може досягати 95–98 % за умов оптимального використання (низький ESR, помірні струми). Для саморобних суперконденсаторів ККД зазвичай менший через вищий ESR та матеріальні обмеження (35–70 %) [5]. Суперконденсатори мають вищий ККД (менші втрати на тепло) у порівнянні з хімічними батареями. Проте суперконденсатори мають нижчу енергетичну щільність, тому вони підходять для застосувань, де потрібні швидкий заряд / розряд та висока надійність. Однак для досягнення максимальної ефективності важливо враховувати конструкцію, залишкову напругу та режим використання (рис. 2).

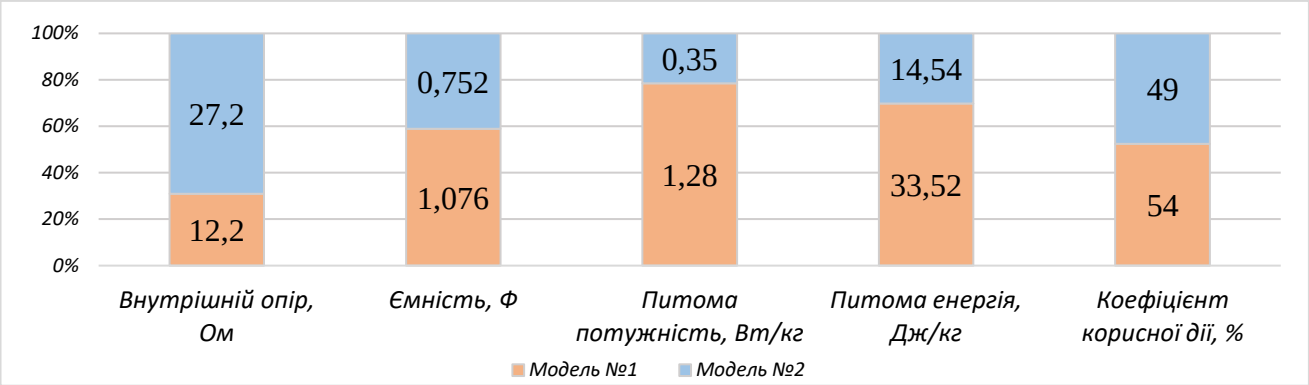


Рис. 2. Діаграма результатів експериментальних досліджень

Висновки. При створенні суперконденсатора було використано матеріали з високою питомою поверхнею (активоване вугілля і графіт) та водний електроліт. Такий підхід забезпечив прийнятну ємність і доступність компонентів для виготовлення. Велика площа поверхні електродів збільшує здатність накопичувати заряд, а мала товщина діелектрика забезпечує високу ємність за низької робочої напруги.

ПОСИЛАННЯ

1. Conway B. E. Electrochemical supercapacitors: scientific fundamentals and technological applications. Kluwer Academic Publishers. 1999. 698 p.
2. Ізотов В. Ю., Громадський Д. Г. Оптимізація поляризаційної складової електродів для суперконденсаторів. Наукові Вісті Національного технічного університету України «КПІ». 2010. № 3(13). С. 73–77.
3. Ariyanto T., Dyatkin B., Zhang G.-R., Kern A., Gogotsi Y., Etzold B.J.M. Synthesis of carbon core-shell pore structures and their performance as supercapacitors. Microporous Mesoporous Mater. 2015. V. 218. P. 130–136.
4. International Standart. Electric-double layer capacitors for use in hybrid electric vehicles. IEC 62576. 2009. P. 11–12.
5. Кучерук І. М., Горбачук І. Т. Загальний курс фізики: Т. 2.: Електрика і магнетизм. К.: Техніка, 1999. 452 с.

УДК 628.336.6

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНО БЕЗПЕЧНОГО СПОСОБУ БІОКОНВЕРСІЇ ВІДХОДІВ МОЛОЧНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ З ОТРИМАННЯМ БІОГАЗУ

М. Д. Івлева[1], С. М. Гармаш[2]

[1]Дніпропетровське відділення Малої академії наук України
[2]Український державний університет науки і технологій
вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, 49000, Україна,
тел.: (095) 538-71-38, e-mail: svgarmash@ukr.net

Проведено лабораторні дослідження з отримання біогазу з молочної сироватки; визначено вихід біогазу та вмісту метану.

Ключові слова: *молочна сироватка, подрібнена солома, вихід біогазу, вміст метану.*

RESEARCH ON AN ENVIRONMENTALLY SAFE METHOD OF BIOCONVERSION OF DAIRY INDUSTRY WASTE TO PRODUCE BIOGAS

M. Ivleva[1], S. Garmash[2]

[1]Junior Academy of Sciences of Ukraine (Dnipropetrovsk Department)
[2]Ukrainian State University of Science and Technology
St. Lazaryana, 2, Dnipro, 49000, Ukraine
phone: (095) 538-71-38, e-mail: svgarmash@ukr.net

Laboratory studies were conducted on biogas production from whey; biogas yield and methane content were determined.

Key words: *whey, chopped straw, biogas yield, methane content..*

ORCID: [1]0009-0005-6897-2919; [2]0000-0002-2658-162X

Результати аналітичного огляду зарубіжного досвіду переробки відходів сільськогосподарської продукції на біогаз свідчать про постійне зростання обсягів виробництва біогазу, що зумовлено його соціально-економічну, екологічну та енергетичну ефективність.

Показано, що реально досягти виробництва біометану в Україні обсягом 1 млрд м³ у 2030 р. і 4,5 млрд м³ у 2050 р. У сфері виробництва біометану Україна може конкурувати з будь-якими країнами світу. Вона має найбільшу в Європі площу сільськогосподарських угідь. Біометанові заводи, окрім біометану, генерують дигестат, який може стати основним органічним добривом, необхідним для відродження українських ґрунтів. Наразі біометан – це найдешевший із можливих відновлюваних газів [1].

За декілька останніх років зроблено низку кроків для розвитку виробництва альтернативних видів палива в Україні на законодавчому рівні:

- ухвалено Закон України від 21 жовтня 2021 р. «Про внесення змін до деяких законів України щодо розвитку виробництва біометану»;
- постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку функціонування реєстру біометану» від 22 липня 2022 р. [2]

ДСТУ EN 16723-1:2023 «Природний газ і біометан в транспорті та біометан для закачування в мережу природного газу» став частиною українського законодавства, на основі якого видаватимуться технічні умови на приєднання біометанових заводів до газорозподільних мереж. Адже біометан знаходить своє застосування на ТЕЦ, як паливо для транспорту, у виробництві теплової енергії, в промисловості та в експорті [3].

У кожній частині світу є значні можливості для виробництва біогазу. Згідно з прогнозами міжнародних організацій доступність сировини для виробництва біогазу зросте на 40% у період до 2040 року.

Сьогодні актуальною проблемою для України є отримання альтернативних джерел енергії, у тому числі з відходів молочної промисловості. Промислова переробка молочної продукції традиційними методами на різні харчові продукти пов’язана з одержанням вторинної сировини у вигляді знежиреного молока і молочної сироватки.

Щомісяця в Україні на утилізацію направляється близько 15−25 т молочної продукції [4]. В Україні почалося виробництво біогазу з відходів молочної промисловості. Проєкт «Нуль відходів на полігон» був започаткований компанією «Данон» і стабільно нині функціонує. Відходи молочної продукції збираються в спеціальні ємності та в подальшому транспортуються на станцію для збору біогазу.

В середньому одна тонна молочної продукції здатна виробити від 50 до 80 м^3 біогазу. Аналіз літературних джерел показує, що проблема раціонального використання молочної сироватки цілком не вирішена в жодній з країн світу і нерозривно пов'язана з проблемою охорони навколишнього середовища [5]. За даними міжнародної молочної федерації молочна сироватка зливається в каналізацію. Щорічно в світі виробляється 140 млн. т молочної сироватки, близько 78% отриманої сироватки зливається в каналізацію, що може завдати шкоди довкіллю. Відомо, що вихід біогазу збільшується при зброджуванні сироватки як моносубстрату, так і добавки до інших субстратів.

Для проведення дослідження в ємність об'ємом 1 л завантажували 200 мл досліджуваної біомаси молочної сироватки, в яку додали 50 г подрібненої соломи, герметично закрили пробкою з трубкою, що з'єднує ємність, гідрозатвор і колбу-приймач газу. Колбу-приймач і мерник газу заповнюли водою. Ємність поміщали в термошафу, в якої при постійній температурі 50-55 °С проводили досліди. Об'єм газу визначали за обсягом витиснутої рідини з колби-приймача у мірник газу. Вміст біогазу визначали на хроматографі газовому ЛХМ-80.

Проведено дослідження анаеробного зброджування молочної сироватки. Повторність досліджень трикратна. Середні результати досліджень представлено в таблиці.

Таблиця 1. Результати отримання біогазу з молочної сироватки

Найменування сировини	**Вихід біогазу на 1 кг сухої речовини, дм^3/кг**	**Вміст метану, %**
Молочна сироватка		
Дослід 1	45	56
Дослід 2	43	57
Дослід 3	42	56
Середнє значення	43	56

Результати експериментів свідчать про ефективність анаеробного методу біоконверсії молочної сироватки, що забезпечує високі показники деструкції органічних речовин відходів, стабільність протікання анаеробних реакцій та виходу біогазу з високим вмістом метану. У промисловості можливо отримати з 1 т сироватки 42-45 м^3 біогазу, що узгоджується з даними джерел літератури.

Аналітичний огляд літератури свідчить, що актуальною проблемою для України є переробка багатотоннажних відходів з отриманням біопалива. Біогаз, отриманий в процесі анаеробного зброджування органічних відходів, які постійно поновлюються, є високоефективним альтернативним джерелом енергії. Відходи молочних заводів складають десятки тисяч тонн щорічно, що є потенційним джерелом для отримання біогазу. Результати досліджень показали, що вихід біогазу на 1 кг сухої речовини сироватки складає 42-45 дм^3, вміст метану 56-57%. У промисловості можливо отримати з 1 т відходів (сироватки) до 300 м^3 біогазу.

Аналіз на газовому хроматографі ЛХМ-80 показав, що вміст метану складає 56-57 %.

Використання цієї технології дозволяє вирішити екологічні проблеми утилізації відходів та одержання альтернативного джерела енергії (біогазу), що свідчить про екологічну доцільність використання вторинної сировини молочної промисловості для отримання біогазу.

ПОСИЛАННЯ

1. Біогазові установки: економічна доцільність та перспективи на майбутнє. – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://agroelita.info/biohazovi-ustanovky-ekonomichna-dotsilnist-ta-perspektyvy-na-maybutnie/(дата звернення: 08.10.2024).
2. Про затвердження Порядку функціонування реєстру біометану: Постанова Кабінету Міністрів України від 22.07.2022 р. № 823. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/823-2022-%D0%BF#Text (дата звернення: 17.10.2024).

3. В Україні прийняли державний стандарт для біометану. Чиста енергія. Регіональна Газова Компанія. URL: https://rgc.ua/ua/news/chista-energija/id/v-ukrajini-prijnjali-derzhavnij-standart-dlja-biom-42391 (дата звернення: 10.11.2024).
4. В Україні працює виробництво біогазу з відходів молочної промисловості [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uadairy.com/v-ukrayini-zapustyly-vyrobnycztvo-biogazu-z-vidhodiv-molochnoyi-promyslovosti/(дата звернення: 09.11.2024).
5. Перспективи виробництва біометану в Україні: аналітична записка UABIO № 29. Київ, 2022. 60 с. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/09/UA-Position-paperUABIO-29.pdf (дата звернення: 15.11.2024).

УДК 621.357.1:661.961.3:338.5

АНАЛІЗ КАПІТАЛЬНИХ ВИТРАТ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРІВ ТА СТРАТЕГІЇ ЗНИЖЕННЯ СОБІВАРТОСТІ

Б. В. Максименко

Кафедра автоматизації електротехнічних та мехатронних комплексів
НН ІЕЕ, НТУУ «КПІ ім Ігоря Сікорського»,
вул. Борщагівська, 115, Київ, 03056, Україна,
тел.: (093) 795-79-17, e-mail: bod555@ukr.net

В аналітичному огляді представлено сучасний стан технологій електролізу водню (AEL, PEM, SOEC, AEM), проаналізовано динаміку капітальних витрат та причини розбіжностей між прогнозами й реальними ринковими показниками. Особливу увагу приділено перспективам зниження собівартості зеленого водню шляхом теплової інтеграції твердооксидних електролізерів (SOEC) з промисловими процесами та тепломережами.

Ключові слова: *воднева енергетика, зелений водень, капітальні витрати, CAPEX, відновлювані джерела енергії (ВДЕ), електролізери.*

CAPITAL COST ANALYSIS OF ELECTROLYZERS AND COST REDUCTION STRATEGIES

B. Maksymenko

Department of Automation of Electrotechnical and Mechatronic Complexes
Educational and Scientific Institute of Energy, Power Engineering and Electromechanics (ESE), National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
115 Borshchahivska St, Kyiv, 03056, Ukraine
phone: (093) 795-79-17, e-mail: bod555@ukr.net

The analytical review presents the current state of hydrogen electrolysis technologies (AEL, PEM, SOEC, AEM), analyzes the dynamics of capital expenditures and the reasons for the discrepancies between forecasts and actual market indicators. Particular attention is paid to the prospects for reducing the cost of green hydrogen through thermal integration of solid oxide electrolyzers (SOEC) with industrial processes and heating networks.

Key words: *hydrogen energy, green hydrogen, capital expenditures, CAPEX renewable energy sources (RES), electrolyzers.*

ORCID: [1]0009-0008-1510-6859

Водень дедалі частіше розглядається як ключовий енергоносій у глобальних стратегіях декарбонізації, особливо для секторів економіки, що важко піддаються прямій електрифікації, таких як важка промисловість та окремі види транспорту [1]. Адекватна оцінка технологій виробництва водню, аналіз економічної доцільності водневих проєктів, формування обґрунтованих інвестиційних рішень та розробка ефективної державної політики неможливі без точних та актуальних даних щодо капітальних витрат (CAPEX). Ринок водневих технологій характеризується високою динамікою, а вартісні показники зазнають швидких змін під впливом технологічного прогресу, ефектів масштабування виробництва, кон'юнктури ринку та політичних стимулів [2].

Електролізери, що здійснюють процес електрохімічного розщеплення води на водень та кисень за допомогою електроенергії, є центральною технологією для виробництва низьковуглецевого водню, зокрема з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) або атомної енергії [3]. До основних технологій електролізу належать лужні (AEL), з протонно-обмінною мембраною (PEM), твердооксидні (SOEC) та аніонообмінні (AEM) електролізери. На сучасному етапі спостерігається інтенсивне зростання глобальних встановлених потужностей електролізерів та анонсування нових масштабних виробничих об'єктів [3]. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), глобальна встановлена потужність електролізерів на кінець 2023 року досягла 1.4 ГВт, що майже вдвічі перевищує показник кінця 2022 року. Аналогічно, виробничі потужності з випуску електролізерів подвоїлися, сягнувши 25 ГВт на рік до кінця 2023 року [3]. Тим не менш, поточні темпи зростання є недостатніми для реалізації амбітних глобальних цілей, таких як сценарій «Net Zero Emissions by 2050» (NZE) від IEA, що передбачає розгортання 560 ГВт електролізних потужностей до 2030 року [3]. Важливим аспектом сучасного дискурсу є значні розбіжності між оптимістичними

прогнозами вартості електролізерів, зробленими в минулі роки, та реальними капітальними витратами поточних проєктів [4].

Декілька років тому експерти прогнозували суттєве зниження вартості електролізерів. Наприклад, у 2021 році Hydrogen Council очікував, що до 2025 року вартість систем електролізу може знизитися до діапазону $480-620/кВт [5]. Однак, станом на 2024 рік, реальні ринкові ціни на електролізери західного виробництва значно перевищували ці прогнози, сягаючи в середньому близько $2500/кВт [6]. Таким чином, спостерігається розбіжність у 130-400% порівняно з раніше прогнозованими показниками.

Цей диспаритет зумовлений комплексом факторів:

- **Інфляційні процеси:** Починаючи з 2021 року, глобальна інфляція призвела до значного зростання цін на сировину, матеріали, енергоносії та робочу силу, що безпосередньо вплинуло на собівартість виробництва електролізерів [6].
- **Повільні темпи масштабування та затримки у реалізації політики підтримки:** Фактичні темпи розгортання великомасштабних виробничих потужностей та реалізації водневих проєктів виявилися нижчими за очікувані. Затримки у впровадженні та функціонуванні державних програм підтримки також негативно вплинули на динаміку ринку та не дозволили повною мірою реалізувати ефект масштабу [6, 7].
- **Недооцінка вартості допоміжного обладнання (Balance of Plant - BoP):** Вартість компонентів системи, окрім самого електролізерного стека (системи очищення води та газу, силова електроніка, компресори, системи охолодження та управління тощо), становить значну частку загального CAPEX (50-70%). Цей фактор не завжди адекватно враховувався у ранніх економічних моделях та прогнозах [8].

Одним із перспективних напрямків зниження собівартості зеленоводню є використання тепла, що генерується або споживається електролізерами, зокрема твердооксидними (SOEC). SOEC функціонують при високих температурах (600-850°C), що дозволяє частину енергії, необхідної для ендотермічної реакції електролізу води, забезпечувати за рахунок зовнішнього теплопостачання. У випадку використання доступного низькопотенційного або відпрацьованого тепла з промислових джерел (наприклад, металургійних чи хімічних підприємств), атомних електростанцій або централізованих теплових мереж, питоме споживання дорогої електроенергії на виробництво водню може бути суттєво зменшене. Це, у свою чергу, позитивно впливає на приведену вартість водню (LCOH).

SOEC також самі є джерелом високоякісного тепла, яке може бути ефективно використане:

- **Інтеграція з промисловими процесами:** Тепло може бути використане для генерації пари, попереднього нагріву сировини або інших технологічних потреб на тому ж підприємстві, де встановлено електролізер.
- **Інтеграція з системами централізованого теплопостачання:** Високотемпературне тепло від SOEC може бути спрямоване до міських тепломереж для забезпечення потреб опалення та гарячого водопостачання, що створює додатковий економічний ефект або знижує загальні енергетичні витрати комплексу.
- Ефективність таких інтегрованих систем може перевищувати 90% [9]. Залежно від вартості тепла та ефективності інтеграції, зниження LCOH може сягати 15-25% і більше.
- Для України, з її розвиненою промисловістю та значною часткою централізованого теплопостачання, використання SOEC (та, в деяких випадках, інших типів електролізерів) в інтегрованих енергетичних системах може стати важливим фактором підвищення економічної привабливості виробництва зеленого водню та сприяти декарбонізації енергетичного сектору та промисловості.

ПОСИЛАННЯ

1. Hydrogen Insights 2023. Hydrogen Council & McKinsey & Company. May 2023. URL: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/05/Hydrogen-Insights-2023.pdf (дата звернення: 13.05.2025).
2. Hydrogen Insights December 2023 Update. Hydrogen Council & McKinsey & Company. Dec 2023. URL: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2023/12/Hydrogen-Insights-Dec-2023-Update.pdf (дата звернення: 13.05.2025).
3. Global Hydrogen Review 2024. International Energy Agency (IEA). 2024. URL: https://iea.blob.core.windows.net/assets/89c1e382-dc59-46ca-aa47-9f7d41531ab5/GlobalHydrogenReview2024.pdf (дата звернення: 13.05.2025).

4. Hydrogen Electrolysis Cost Projections From Major Organizations Low By 60% To 300%. Fletcher, A. CleanTechnica. 24.02.2025. URL: https://cleantechnica.com/2025/02/24/hydrogen-electrolysis-cost-projections-from-major-organizations-low-by-60-to-300/ (дата звернення: 13.05.2025).
5. Hydrogen Insights 2021. Hydrogen Council & McKinsey & Company. Feb 2021. URL: https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2021/02/Hydrogen-Insights-2021.pdf (дата звернення: 13.05.2025).
6. Cost of electrolysers for green hydrogen production is rising instead of falling: BNEF. Collins, L. Hydrogen Insight (цитуючи BNEF Electrolyser Price Survey 2024). 11.04.2025. URL: https://www.hydrogeninsight.com/electrolysers/cost-of-electrolysers-for-green-hydrogen-production-is-rising-instead-of-falling-bnef/2-1-1607220 (дата звернення: 13.05.2025).
7. Special report 11/2024: The EU's industrial policy on renewable hydrogen. European Court of Auditors. 2024. URL: https://www.eca.europa.eu/en/publications/SR-2024-11 (дата звернення: 13.05.2025).
8. Manufacturing Cost Analysis for Proton Exchange Membrane Water Electrolyzers. Badgett, A., et al. NREL/TP-5700-72740. National Renewable Energy Laboratory. 2019. URL: https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72740.pdf (дата звернення: 13.05.2025).
9. Topsoe reaches new milestone: SOEC demo reveals strong results. Topsoe Blog. 2024. URL: https://www.topsoe.com/blog/breakthrough-in-green-hydrogen-topsoes-soec-demo-reveals-strong-results (дата звернення: 13.05.2025).

УДК 621.482

ПОРІВНЯННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ, СОНЯЧНИХ ТА ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

О. В. Лисак

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

Проаналізовано екологічні параметри впливу на навколишнє середовище геотермальних, сонячних та вітрових електростанцій. Аналіз літератури показав, що наразі відсутня єдина загальноприйнята методика для порівняння зазначених електростанцій, а також, що кожен з цих типів електростанцій має унікальні відмінності, що ускладнює їх порівняння. Проте як за викидами CO_2, так і за оцінкою життєвого циклу геотермальні електростанції мають більший негативний вплив на навколишнє середовище, ніж сонячні та вітрові електростанції.

Ключові слова: *геотермальна енергетика, сонячна енергетика, вітрова енергетика, екологія, навколишнє середовище .*

COMPARISON OF ENVIRONMENTAL PARAMETERS OF GEOTHERMAL, SOLAR AND WIND POWER PLANTS

O. Lysak

Institute for Renewable Energy of National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (044) 206-28-09, e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

The article analyzes the environmental impact of geothermal, solar and wind power plants. The literature analysis has shown that there is currently no single generally accepted methodology for comparing these power plants, and that each of these types of power plants has unique differences that make them difficult to compare. Nevertheless, both in terms of CO_2 emissions and life cycle assessment, geothermal power plants have a greater negative impact on the environment than solar and wind power plants.

Key words: *geothermal energy, solar energy, wind energy, ecology, environment.*

ORCID: 0000-0002-4934-0685

Вступ. Геотермальна енергія наразі займає значно менший відсоток у загальному світовому енергобалансі порівняно з такими відновлюваними джерелами енергії, як сонячна енергія та енергія вітру, а темпи зростання потужності геотермальної енергетики наразі є значно нижчими, ніж у сонячної та вітрової енергетики [1]. Але за рахунок майбутніх очікуваних технологічних проривів в сфері геотермальної енергетики та зниження вартості спорудження згідно аналізу, наведеного в звіті Міжнародного енергетичного агентства [2], очікується, що геотермальна енергетика може задовольнити до 15% зростання світового попиту на електроенергію в період з 2025 до 2050 року.

В [2] серед важливих причин такого потенційного підвищення використання геотермальної енергетики є те, що геотермальні електростанції здатні забезпечити високий рівень постійності виробництва електроенергії на відміну від значно змінного у часі виробництва електроенергії вітровими та сонячними електростанціями. Проте обґрунтування вибору застосування саме геотермальної енергії вимагає комплексного підходу, зокрема порівняння екологічних параметрів геотермальних електростанцій з іншими можливими варіантами. В цій роботі як інші варіанти розглянуто сонячні (фотовольтаїчні) та вітрові електростанції, оскільки саме їх застосування розглядається як таке, що відповідає концепціям розвитку сталої та відновлюваної енергетики – тобто, аналіз стосуватиметься випадку, коли вибір для користувача обмежено виключно варіантами застосування відновлюваних джерел енергії.

Мета та задачі роботи. Метою роботи є аналіз підходів до визначення екологічних параметрів геотермальних електростанцій та їх порівнянням з екологічними параметрами сонячних та вітрових електростанцій. Для цього поставлено наступні задачі:

1. провести аналіз літератури, що розглядає визначення екологічних параметрів електростанцій, та зробити узагальнення різних підходів для випадку застосування таких відновлюваних джерел енергії як сонячна, вітрова та геотермальна енергія;
2. порівняти показники екологічних параметрів, що наведені в літературі з цього питання.

Аналіз літератури, що розглядає визначення екологічних параметрів електростанцій. Першочергово, необхідно звернути увагу на те, що саме вважати екологічними параметрами. Якщо розглядати типи впливу за їх категоріями (табл. 1), то в абстракту статті [3], опублікованій 2008 року в Україні, згадувались впливи саме на довкілля: на повітря, на водні ресурси та на земельні ресурси, в той час як в статті [4], опублікованій закордоном 2022 року, розглядались також впливи на людей та різні інші типи впливу.

Таблиця 1. Категорії екологічних параметрів електростанцій

Країна публікації	Джерело	Рік	Категорії типів впливу				
			На повітря	На водні ресурси	На земельні ресурси	На людей	Різні інші
Україна	[3]	2008	Враховано	Враховано	Враховано	Не враховано	Не враховано
Закордонне видання	[4]	2022	Враховано	Враховано	Враховано	Враховано	Враховано

Варто відзначити, що зміст схожих за назвою категорії типів впливів є відмінним. Наприклад, в [3] категорія типу впливів на повітря стосувалось переважно викидів забруднюючих речовин і парникових газів в повітря, в той час як в [4] до цієї категорії входили впливи, пов'язані з птахами (які враховувались у випадку сонячних та вітрових електростанцій, але відсутній у випадку геотермальних електростанцій): втрата птахів, вплив на середовище існування птахів та вплив на міграцію птахів. Проте тут різницю можна пояснити тим, що [3] була написано до масового впровадження сонячних та вітрових електростанцій в Україні, тому такі фактори там не було розглянуто.

Порівняння екологічних параметрів сонячних, вітрових та геотермальних електростанцій. Для порівняння параметрів зазначених електростанцій, необхідним є використання єдиної методики. Проте ще на етапі оцінки окремих параметрів можуть виникнути певні складнощі. Наприклад, вже зазначений вище негативний вплив на птахів у випадку одного з регіонів Китаю був причиною закриття вже побудованих вітрових електростанцій [5], що фактично прибирає їх з порівняння з сонячними та вітровими електростанціями.

Викиди парникових газів від електростанцій. Окремо треба відзначити фактор викидів в повітря парникових газів – в першу чергу CO_2, бо ці викиди найбільше впливають на екологічні параметри геотермальних електростанцій [6,7]. Параметр CO_2 розглядається при порівнянні різного типу електростанцій навіть за найбільш простого моделювання, оскільки є переважно обов'язковим для моніторингу – зокрема для вугільних станцій [8], викиди від яких є найбільш значними, і які в першу планують заміщувати відновлюваними джерелами енергії. В [9] зазначалось, що деякі з проєктів геотермальних електростанцій, розташованих в Італії та Туреччині, мали рівень викидів парникових газів, що перевищував рівень викидів вугільних станцій. Разом з тим, значний рівень викидів геотермальних електростанцій можна було знизити, якщо перейти на закриту технологію, а саме на бінарні геотермальні електростанції – в прикладі з [10] зниження викидів CO_2 складало 82%, але також призвело й до зменшення виробітку електроенергії на 16% внаслідок зниження ефективності перетворення енергії. При цьому, такий аналіз можна було б ускладнити, додавши врахування витоків робочої рідини для бінарних геотермальних електростанцій, хоча це врахування не значно би підвищило оцінку негативного впливу на навколишнє середовище [11].

Для порівняння: викиди CO_2 в [9] від геотермальних електростанцій Ісландії, які були найменшими серед перелічених, складали 34 г CO_2 / (кВт·год), а для геотермальних електростанцій Італії, які були найбільшими серед перелічених, складали 330 г CO_2 / (кВт·год), тобто майже в 10 разів більше. При цьому в [12] для фотовольтаїчних панелей це значення становило 40 г CO_2 / (кВт·год), а в [13] для наземних вітрових електростанцій 11,9 г CO_2 / (кВт·год). Треба відзначити, що ці показники значно залежать від технологічного рівня розвитку технологій – в більш ранній роботі 2009 року [14] показники складали: для геотермальних електростанцій – 170 г CO_2 / (кВт·год), для сонячних електростанцій – 90 г CO_2 / (кВт·год) та для вітрових електростанцій - 25 г CO_2 / (кВт·год).

Інші екологічні параметри для порівняння електростанцій. В [15,16] як параметри впливу на навколишнє середовище розглядались споживання води та використання площі поверхні землі. Разом з тим, інші параметри, які розглядались як екологічні в [4], в зазначених джерелах [15,16] розглядались як соціальні (табл. 2). Проте такий підхід не має відповідного перерахунку в конкретні числові показники та обмежувався лише показниками «великий» чи «незначний».

Таблиця 2. Згадки про найбільш суттєві екологічні параметри електростанцій

Тип електростанції	Типи впливу										
	Згадки про найбільш суттєві екологічні параметри електростанцій, які розглядаються в [16] як соціальні.							Найбільш суттєві впливи згідно [17]			
	Токсини	Візуальне забруднення	Небезпека для птахів	Шумове забруднення	Забруднення	Запах	Підвищення сейсмічної активності	Споживання води	Екотоксичність		
									прісної води	морської води	наземна
Сонячна	+	+	–	–	–	–	–	–	–	+	+
Вітрова	–	+	+	+	–	–	–	–	–	+	+
Геотермальна	–	–	–	+	+	+	+	+	+	+	–

Порівняння електростанцій за оцінки життєвого циклу. На відміну від наведеного вище підходу, перерахунок в конкретні чисельні показники (еко-бали) застосовувався в [17] в оцінці життєвого циклу (*англ.* life cycle assessment, LCA) електростанцій для порівняння всієї сукупності їх екологічних параметрів. В [18] зазначалось, що наразі ситуація з сучасним рівнем (станом на 2022 рік згідно дати публікації статті) розвитку LCA в Україні відповідає періоду «привернення уваги», який мав місце в США та країнах Західної Європи у 1960-ті роки: аналізувались окремі ізольовані бізнес-кейси, що застосовували найпростіші методи. Таким чином, в умовах України є потреба для поглиблення підходу для оцінки життєвого циклу, і тому є сенс проаналізувати закордонні методики.

В [4] наводилась оцінка цього параметра для всіх видів відновлюваних джерел енергії, а в [17] – для порівняння геотермальних електростанцій з сонячними та вітровими електростанціями. В обох випадках оцінка здійснювалась через використання стандарту ISO 14044:2013 «Оцінка життєвого циклу» [19], де основна увага приділялась третьому етапу, який стосувався оцінювання впливу на навколишнє середовище протягом життєвого циклу. Цей аналіз суттєво залежав від того, яка методика була обрана. Безпосередньо, в [4] було проаналізовано [17] та показано як за застосування методів ReCiPe 2016 [20] та ILCD 2011 [21] для одних й тих самих електростанцій в певних випадках давало відмінний результат, з чого в [4] було зроблено висновок проте, що потрібною є розробка стандартного та прийнятого на міжнародному рівні метода LCA для електростанцій, що використовують відновлювані джерела енергії.

Для визначення впливу на навколишнє середовище в [17] використовувався загальний її опис, витрати матеріалів та енергії для спорудження, витрати під час експлуатації та витрати під час експлуатації. Найбільш суттєві з впливів, розрахованих для випадку застосування методу ReCiPe 2016 midpoint level, наведені в табл. 2.

В якості висновку зазначимо, що розрахунок в [17] показував, що найменший негативний вплив на навколишнє середовище мали вітрові електростанції, наступними були сонячні електростанції (за використання фотовольтаїчних сонячних панелей) і останніми були саме геотермальні електростанції – проте навіть в їх випадку викиди були меншими за ті, що були від викопного палива. Це також відповідає наведеному вище аналізу викидів CO_2, де найменші викиди були у вітрових електростанцій.

Висновки:

1. Значну складність при порівнянні екологічних параметрів електростанцій становить те, що деякі з їх параметрів є унікальними і не мають відповідника в інших електростанціях.
2. Геотермальні електростанції між собою переважно порівнюють згідно параметру викидів парникових газів, в першу чергу за викидами CO_2 – а ключовими методом зниження цих викидів є перехід до використання бінарних геотермальних електростанцій, що дозволяє значно знизити викиди CO_2, за незначного зниження їх електричної потужності.
3. Відсутня єдина стандартизована методика для оцінки екологічних параметрів електростанцій. Загалом, згідно наведеного в цій роботі прикладу, вплив геотермальних електростанцій на навколишнє середовище є вищим, ніж у вітрових та сонячних електростанцій, але все одно меншим, ніж у електростанцій, що використовують викопне паливо.

ПОСИЛАННЯ

1. Rybach L. Geothermal Power Growth 1995–2013–A Comparison with Other Renewables. Energies. 2014. Vol. 7, no. 8. P. 4802–4812. DOI: https://doi.org/10.3390/en7084802
2. IEA. The Future of Geothermal Energy. Paris: IEA, 2024. URL: https://www.iea.org/reports/the-future-of-geothermal-energy (date of access: 10.04.2025)
3. Нечаєва Т. П., Шульженко С. В., Сас Д. П., Парасюк М. В. Фактори екологічного впливу електроенергетичних. Проблеми загальної енергетики. 2008. № 18. С. 54-60. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/3018 (дата звернення: 10.04.2025).
4. Rahman A., Farrok O., Haque M. M. Environmental impact of renewable energy source based electrical power plants: Solar, wind, hydroelectric, biomass, geothermal, tidal, ocean, and osmotic. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2022. Vol. 161. P. 112279. URL: https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112279
5. Meng L. et al. Blaming the wind? The impact of wind turbine on bird biodiversity. Journal of Development Economics. 2024. P. 103402. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2024.103402
6. Paulillo A. et al. Influential parameters for estimating the environmental impacts of geothermal power: A global sensitivity analysis study. Cleaner Environmental Systems. 2021. Vol. 3. P. 100054. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cesys.2021.100054
7. O'Sullivan M. et al. Carbon dioxide emissions from geothermal power plants. Renewable Energy. 2021. Vol. 175. P. 990–1000. DOI: https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.021
8. Bartan A., Kucukali S., Ar I. Environmental impact assessment of coal power plants in operation. E3S Web Conf. 2017. Vol. 22. P. 00011. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172200011
9. Fridriksson T. et al. Greenhouse Gas Emissions from Geothermal Power Production. PROCEEDINGS, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, 2017. URL: https://documents1.worldbank.org/curated/en/875761592973336676/pdf/Greenhouse-Gas-Emissions-from-Geothermal-Power-Production.pdf (date of access: 10.04.2025)
10. González-García H. et al. CO2 emission assessment of the geothermal power station Los Humeros, Mexico. Geothermics. 2022. Vol. 104. P. 102471. DOI: http://dx.doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102471
11. Mattson E., Mallozzi L., Mines G. Binary Power Plant CO2 Life Cycle Emissions Including Isobutane Fugitive Leakage. PROCEEDINGS, 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, 2017.URL: https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2017/Mattson.pdf (date of access: 10.04.2025)
12. Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics. NREL, 2012. URL: https://docs.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf (date of access: 10.04.2025)
13. Bhandari R., Kumar B., Mayer F. Life cycle greenhouse gas emission from wind farms in reference to turbine sizes and capacity factors. Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 277. P. 123385. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123385
14. Evans A., Strezov V., Evans T.J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2009. Vol. 13, № 5. P. 1082–1088. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.03.008
15. Li K. et al. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2015. Vol. 42. P. 1464–1474. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.049
16. Li K. Comparison of geothermal with solar and wind power generation systems. PROCEEDINGS, Thirty-Eighth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, 2013. URL: https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/SGW/2013/Li.pdf (date of access: 10.04.2025)
17. Basosi R. et al. Life Cycle Analysis of a Geothermal Power Plant: Comparison of the Environmental Performance with Other Renewable Energy Systems. Sustainability. 2020. Vol. 12, № 7. P. 2786. DOI: https://doi.org/10.3390/su12072786
18. Коблянська І. Еволюція методології оцінювання життєвого циклу: світовий та вітчизняний контексти. Економіка та суспільство. 2022. № 42. DOI: https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-42-27
19. ДСТУ ISO 14040:2013 Екологічне управління. Оцінювання життєвого циклу. Принципи та структура (ISO 14040:2006, IDT).
20. Huijbregts M.A.J. et al. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Int J Life Cycle Assess. 2017. Vol. 22, № 2. P. 138–147. DOI: https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y
21. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. International Reference Life Cycle Data System (ILCD) handbook : framework and requirements for life cycle impact assessment models and indicators. LU: Publications Office, 2010. DOI: https://data.europa.eu/doi/10.2788/38719

УДК 621.482

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ДЖЕРЕЛА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ ПРИ РЕКОНСТРУКЦІЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ

О. В. Лисак

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

Визначено варіанти переходу на відновлювані джерела енергії при реконструкції систем опалення. Аналіз літератури показав, що головним фактором для їх порівняння слугує значення нормалізованої вартості теплоти, при цьому за реконструкції систем опалення переважно порівнюють ефективність застосування теплових насосів та біомаси. Це порівняння ускладнюється через значні відмінності пільг, вартості та умов впровадження відновлюваних джерел енергії в системи опалення.

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, реконструкція, опалення, теплові насоси, біомаса.*

SELECTION OF A RENEWABLE ENERGY SOURCE FOR THE RECONSTRUCTION OF THE HEATING SYSTEM

O. Lysak

Institute for Renewable Energy of National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (044) 206-28-09, e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com

The article identifies the options for transition to renewable energy sources when reconstructing heating systems. An analysis of the literature has shown that the main factor for comparing them is the value of the levelised cost of heat, while the efficiency of heat pumps and biomass is mainly compared when reconstructing heating systems. This comparison is complicated by significant differences in the benefits, costs and conditions for introducing renewable energy sources into heating systems.

Key words: *renewable energy sources, reconstruction, heating, heat pumps, biomass.*

ORCID: 0000-0002-4934-0685

Вступ. Сьогодні в Україні перехід на відновлювані джерела енергії при реконструкції систем опалення є складовою підвищення стійкості систем централізованого теплопостачання [1]. Хоча в літературі представлені й інші підходи до підвищення ефективності систем опалення: в [2] розглядалась ситуація, коли реконструювалась власне система опалення будівлі при збереженні існуючого джерела теплоти, оскільки швидке оновлення системи опалення визначалось як більш пріоритетна задача через її зношеність, а в [3] основна увага приділялась матеріалам та технології термомодернізації будівель.

Хоча на даному етапі серед відновлюваних джерел енергії для забезпечення опалення в Україні переважно використовується біомаса, а теплові насоси складають лише незначну частку в цій складовій [4], надалі очікується суттєве поширення теплових насосів та електричних бойлерів для забезпечення роботи систем опалення [3].

Мета та задачі роботи. Метою роботи є аналіз того, які фактори враховують при аналізі переходу на відновлювані джерела енергії при реконструкції систем опалення. Для цього поставлено наступна задача: провести аналіз літератури, що розглядає перехід на відновлювані джерела енергії при реконструкції систем опалення, та визначити фактори, про які згадується в цьому аналізі.

Аналіз літератури та визначення факторів. В [5] було надані такі варіанти переходу на відновлювані джерела енергії в системах опалення:

1. електрифікація системи опалення з використанням електрики, виробленої відновлюваними джерелами енергії (мова може йти як про системи прямого або акумуляційного електричного опалення, так й про застосування теплових насосів);

2. біомаса;
3. відновлюваний газ (біогаз, біометан та зелений водень);
4. пряме використання сонячної енергії;
5. пряме використання геотермальної енергії.

Потрібно, відзначити, що наразі відсутні універсальні методики для порівняння ефективності чи економічної доцільності різних варіантів переходу. Таку відсутність можна пояснити тим, що 1) перехід значно залежить від регіональних факторів, таких як вартість та доступність місцевих ресурсів; та 2) різним ступенем поширення кожного з п'яти зазначених варіантів, тому переважно аналіз здійснюється окремо для тих варіантів, які є найбільш розповсюдженими. Переважним методом порівняння є використання економічного показника – нормалізованої вартості теплоти (*англ.* Levelised Cost of Heat, LCOH) – розрахункової собівартості виробництва теплоти протягом усього життєвого циклу системи опалення (табл. 1) згідно [6–10].

Табл. 1. LCOH для системи опалення з використанням джерела відновлюваної енергії

Тип системи опалення з використанням джерела відновлюваної енергії	**Джерело**	**Характеристики LCOH згідно джерела літератури**		**LCOH, UAH/Гкал**	**Порівняння зі значенням першого показника, %**	**Примітка**
		Значення	**Одиниці вимірювання**			
Теплові насоси						
Тепловий насос «повітря-вода»	[6,7]	98,9	EUR/Гкал	4389	100,0	Взято з табл. А1 даного джерела для випадку №11 з тепловим насосом Hajster Velet Split 60IS3R32 за вищого значення вартості електроенергії та двозонного тарифу на електроенергію за умови ставки дисконтування в 10%
Повітряний тепловий насос	[8]	96,2	EUR/(МВт·год)	3672	83,7	Для випадку повної реновації окремої будівлі в м. Турин (Італія), показник - AS.
Геотермальний тепловий насос	[8]	111,3	EUR/(МВт·год)	4248	96,8	Для випадку повної реновації окремої будівлі в м. Турин (Італія), показник - GS_{mc}.
Використання теплових насосів	[10]	112,94	PLN/ГДж	5125	116,8	Наведено дані з табл. 1 для Ruda Huta без врахування субсидій.
Котли з використанням біопалива						
Пелетний котел	[8]	118,7	EUR/(МВт·год)	4530	103,2	Для випадку повної реновації окремої будівлі в м. Турин (Італія), показник - PEL
Котли, що використовують паливні гранули з деревини	[9]	21,44	USD/ГДж	3713	84,6	Наведене значення узяті з табл. 4 для випадку № 1 в період червня 2022 року.
Котли, що використовують паливні гранули з соняшникового лушпиння	[9]	14,43	USD/ГДж	2499	56,9	Наведене значення узяті з табл. 4 для випадку № 8 в період червня 2022 року.
Котли, що використовують солому	[9]	13,44	USD/ГДж	2327	53,0	Наведене значення узяті з табл. 4 для випадку № 13 в період червня 2022 року.
Використання біомаси	[10]	145,21	PLN/ГДж	6589	150,1	Наведено дані з табл. 1 для Dębowa Kłoda без врахування субсидій.

Примітки: 1. У випадку теплового насосу «повітря-вода» використовується співвідношення між значеннями LCOH за EUR/Гкал та грн/Гкал в [6,7], а саме: 44,38 грн/євро. Це значення використовується для перерахунку євро в гривні. 2. У випадку USD прийнято курс: 41,33 UAH/USD. 3. У випадку PLN прийнято курс: 10,83 UAH/PLN.

Розглянемо ситуацію переходу на прикладі [10] з Польщі, де, як і в Україні, понад 90% від всього теплопостачання від відновлюваних джерел енергії забезпечується саме за рахунок біомаси. Результати розрахунків в [10] виявились суперечливими: теплові насоси згідно розрахунків мали менше значення LCOH, ніж котли на біомасі – але вище

значення LCOH котлів на біомасі виникало через вищу, ніж у теплових насосів, потужність. Ця вища потужність використовувалась для забезпечення пікового навантаження й, відповідно, призводила до зменшення використання вже наявної потужності котлів на біомасі. Тобто, показник LCOH визначався за вкрай різних умов експлуатації двох варіантів системи опалення. В табл. 1 показники LCOH теплових насосів також є як вищими, так й нижчими за аналогічні показники за використання біомаси.

При цьому в [10] приділялась значна увага тим субсидіям, що надаються при встановленні таких систем. Зокрема, згідно аналізу [6] у випадку теплових насосів для умов України саме субсидії на встановлення теплових насосів та пільгове значення вартості електроенергії були визначальними факторами для того, аби встановлення теплових насосів було економічно доцільним. Також в [6] зазначалось, що в промоматеріалах для користувачів, зацікавлених в придбанні теплових насосів, їх значення LCOH часто було заниженим. При цьому бажаним варіантом було встановлення теплових насосів, що вироблені в Україні, оскільки їх вартість була нижчою за іноземні [6]. Хоча варіанти зі встановленням теплових насосів в Італії [8] на даному етапі мали LCOH, співставний з українським.

Окрім вартості власне самого обладнання та електроенергії, в [8] також розглядалось те, що за реконструкції системи та переходу на застосування теплових насосів потрібно було включити до вартості розглянутих рішень й необхідність заміни радіаторів в водяній системі опалення для забезпечення необхідного теплового режиму приміщення при зниженні температурного режиму системи опалення.

Висновки:

1. Згідно представленого аналізу, є п’ять основних напрямків при реконструкції систем опалення: 1) електрифікація системи опалення з використанням електрики, виробленої відновлюваними джерелами енергії; 2) біомаса; 3) відновлюваний газ; 4) пряме використання сонячної енергії; 5) пряме використання геотермальної енергії.
2. Вибір переходу на відновлювані джерела енергії при реконструкції системи опалення переважно обґрунтовується за використання характеристики нормалізованої вартості теплоти LCOH, але значення цієї характеристики значно коливається через значні відмінності пільг, вартості та умов експлуатації розглянутих варіантів систем опалення з використання відновлюваних джерел енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Киризюк С. Перехід на відновлювальні джерела енергії як основа підвищення стійкості систем централізованого теплопостачання в умовах ринкового регулювання. Науковий вісник Міжнародної асоціації науковців. Серія: економіка, управління, безпека, технології. 2024. №4. Т. 3. DOI: https://doi.org/10.56197/2786-5827/2024-3-4-3
2. Тарадай О. М., Яременко М. О., Павлюк Н. Ю., Дяченко С. В. Реконструкція систем опалення житлових будинків зі збереженням діючих джерел теплоти. Теплофізика та теплоенергетика. 2024. №2. Т. 46. С. 83-91. DOI: https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2024.9
3. Salim S.S. et al. From Retrofitting to Renewables: Navigating Energy Transition Pathways for European Residential Space Heating. Energies. 2024. Vol. 17, № 10. P. 2363. DOI: https://doi.org/10.3390/en17102363
4. Lysak O.V. Analysis of the current state and the future prospects of renewable energy in heating and cooling systems in Ukraine. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 2024. Vol. 1415, № 1. P. 012125. DOI: http://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/1415/1/012125
5. Renewable energy policies in a time of transition: Heating and cooling [Electronic resource]. 2020. URL: https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling (accessed: 12.05.2025).
6. Stanytsina V. et al. Comparative Analysis of Levelized Cost of Heat in Implemented and Calculated Heat Supply Systems with Heat Pumps in Ukraine. Energies. 2025. Vol. 18, № 5. P. 1110. DOI: https://doi.org/10.3390/en18051110
7. Формування технологічних структур енергонезалежних громад : монографія /за заг. ред. В. В. Каплуна / Національний університет біоресурсів і природокористування України ; Інститут загальної енергетики НАН України. – Одеса : Видавничий дім «Гельветика», 2024. – 312 с. ISBN 978-617-554-373-3.
8. Ruffino E. et al. Heat Pumps, Wood Biomass and Fossil Fuel Solutions in the Renovation of Buildings: A Techno-Economic Analysis Applied to Piedmont Region (NW Italy). Energies. 2022. Vol. 15, № 7. P. 2375. DOI: https://doi.org/10.3390/en15072375
9. Stanytsina V. et al. Fossil Fuel and Biofuel Boilers in Ukraine: Trends of Changes in Levelized Cost of Heat // Energies. 2022. Vol. 15, № 19. P. 7215. DOI: https://doi.org/10.3390/en15197215
10. Gradziuk B., Gradziuk P. HEAT PUMPS VERSUS BIOMASS BOILERS: a comparative analysis of heating costs for public buildings. Annals PAAAE. 2020. Vol. XXII, № 3. P. 77–85. DOI: https://doi.org/10.22004/ag.econ.308220

УДК 621.311.25

ФУНДАМЕНТАЛЬНА ТЕПЛОФІЗИЧНА ІНЖЕНЕРІЯ БУДІВЕЛЬ В КОНТЕКСТІ ВІДНОВЛЕННЯ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

Б. І. Басок, Є. Т. Базєєв

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Булаховського, 2, Україна
borys.basok@gmail.com

Наведено результати застосування досягнень фундаментальної теплофізичної інженерії для підвищення енергоефективності будівель, зокрема при створенні пасивних будівель типу «нуль-енергії».

Ключові слова: *енергоефективність, пасивна будівля, відновлювані джерела енергії, фундаментальна інженерія*

FUNDAMENTAL THERMOPHYSICAL ENGINEERING OF BUILDINGS IN THE CONTEXT OF THE INFRASTRUCTURE RENEWAL OF UKRAINE

B. Basok, E. Bazeev

Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2 Bulakhovskogo St., Ukraine
borys.basok@gmail.com

The results of the application of the achievements of fundamental thermal engineering to increase the energy efficiency of buildings, in particular when creating passive buildings of the "zero-energy" type are presented.

Keywords: *energy efficiency, passive building, renewable energy sources, fundamental engineering*

Основу нового наукового напрямку, сформованого в ІТТФ НАН України в останні роки, складає методологія організаційно-економічного та інноваційного забезпечення модернізації систем енергопостачання та підвищення енергоефективності будівель і споруд з урахуванням теплофізичних основ їх енергозабезпечення, термомодернізації та тренду використання низьковуглецевих технологій у тріаді енергетика-економіка-екологія стосовно сучасного технологічного устрою. В доповіді представлено основні напрямки фундаментальних наукових досліджень і втілення в економіку України їх результатів досліджень і реалізації запропонованих інноваційних науково-технічних заходів із підвищення енергоефективності будівельної сфери.

В середньому 90% свого часу людина проводить в будівлях. І в них потрібно створити належний мікроклімат, наприклад, згідно ДБН В.1.2-8:2021 (Основні вимоги до будівель і споруд. Гігієна, здоров'я та захист довкілля). Загалом, в Україні на енергоспоживання у будівлях і спорудах припадає близько 40% кінцевої енергії, зокрема 31,7% - на сектор житлових будинків (Мінрегіон України). Це найбільш енерговитратний сектор економіки України, тут зосереджений найбільший потенціал підвищення енергоефективності та декарбонізації енергетики, і саме цій сфері потрібно приділяти найбільше уваги. Будівля є кінцевим споживачем енергії, далі лише дисипація енергії через фасади в довкілля. Заощадження енергії в будівлі автоматично реалізуються при розподілі, транспортуванні і при генерації, адже енергоефективність у кінцевого споживача найбільш доцільна. Наразі річне теплоспоживання фонду будівель України у середньому становить близько 230 кВт·год/м^2, в той час як в ЄС цей показник знаходиться в межах 90-120 кВт·год/м^2, а у Німеччині – навіть 70-90 кВт·год/м^2. Спираючись на розгалужене законодавство (Закони України - «Про енергетичну ефективність будівель», «Про Фонд енергоефективності», «Про енергетичну ефективність») Україні вкрай необхідно досягати орієнтирів і рівня ЄС.

Окрім цього будівля – це:

- енергетичний об'єкт довготривалого життєвого циклу – до 100 років і більше;
- може виступати мініенергорегулятором ОЕС, потенційним енерговиробником і енергоакумулятором;
- мікрооб'єкт енергетичної безпеки, енергонезалежності, енергостійкості і живучості в екстремальних умовах;
- можливий елемент розосереджених, автономних чи індивідуальних енергосистем мікрокліматизації.

Будівлі в Україні – це чутлива соціальна політика, а мешканці – потенційний електорат.

Основою обґрунтування та застосування наведених підходів виступає будівельна теплофізика як окрема частина більш широкої сфери застосування інженерної теплофізики, котра є місією діяльності Інституту технічної теплофізики НАН України.

Згідно Постанови Президії Національної академії наук України № 146 від 5 квітня 2023 р. в ІТТФ НАН України сформовано новий науково-технічний напрям «Фундаментальна теплофізична інженерія будівель в контексті відновлення України», основним завданням якого є науковий супровід та підтримка державної політики підвищення енергоефективності в сфері будівель, зокрема у реалізації Довгострокової стратегії термомодернізації будівель на період до 2050 року та у виконанні Національних планів дій: з енергетики та клімату; з відновлюваної енергетики; з енергоефективності; зі збільшення кількості будівель з близьким до нульового споживанням енергії. За період 2020-2024 рр. колективом відділу ТОЕТ видано 9 монографій (6 - у видавництві «Наукова думка»; ще 2 – англомовні, видані за кордоном); надруковано 78 наукових статей, що входять до наукометричної бази Scopus (31 із них - з квартилями Q1 і Q2); видано 38 статей в фахових журналах України категорії Б. Створена низка унікальних експериментальних стендів та дослідно-промислових установок. Реалізовано на практиці 145 впроваджень. Молоді вчені відділу отримали 3 премії Президента України для молодих вчених, 2 премії Верховної Ради України для молодих вчених, 3 премії міського голови м. Києва для молодих вчених. Ними отримана 1 премія НАН України та виконано 4 гранти Президента України для молодих науковців.

Основні наукові, технічні та інноваційні результати:

- Розробка, корегування та супровід заходів енергетичної стратегії України до 2050 р. стосовно: енергоефективності; теплоенергетики; відновлюваних джерел енергії, включаючи використання енергії довкілля та скидних теплових енергоресурсів.
- Обґрунтовані оригінальні підходи, принципи і методи рішення стратегічного управління технологічною модернізацією енергопостачання і підвищення енергоефективності теплозабезпечення будівель з застосуванням технологічних та організаційно-економічних інновацій, урахуванням тренду використання відновлюваних джерел енергії і інтелектуальних систем.
- Запропонована система індикаторів і гарантій технологічної модернізації теплозабезпечення будівель, які спрямовані на безпеку, збереження та підвищення якості життєдіяльності людини.

Вказані підходи сформували основні напрямки наукових досліджень, а саме: когенераційні технології сумісного виробництва теплоти і електрики; теплонасосні технології на природних та скидних техногенних енергоресурсах; пасивні будівлі, будівлі типу «0-енергії», інтелектуальні будівлі; теплова взаємодія будівель із довкіллям, вплив інсоляції; інноваційні системи теплової ізоляції; геотермальна вентиляція; низькотемпературні системи теплозабезпечення; дослідження нестійкості потоку теплоносія і запобігання її руйнівному впливу; ґрунтове акумулювання (добове, сезонне) теплоти, процеси вилучення теплоти; автономне електрозабезпечення на основі інсоляції і енергії вітру; глобальне потепління і адаптація до змін клімату.

Саме тому впродовж останніх п’яти років 2020-2024 рр. в ІТТФ НАН України для сфери будівель були успішно виконані фундаментальні теми:

- Акумуляційна система теплозабезпечення будівлі на основі використання відновлюваних джерел енергії та електроенергії нічного провалу електроспоживання;
- Аеродинаміка та теплообмін в світлопрозорих конструкціях при їх взаємодії з тепловим випромінюванням;
- Розроблення і оптимізація енергозберігаючих систем геотермальної вентиляції для енергоефективних будинків;
- Розроблення науково-технічних засад інтенсифікації тепломасообміну в пористих середовищах для матеріалів будівельних конструкцій та теплоенергетичного обладнання;
- Розвиток наукових засад теплової взаємодії будівлі з довкіллям та підвищення її енергоефективності на основі застосування інтелектуальних систем енергозабезпечення;
- Аеродинаміка, теплообмін та інновації для підвищення енергоефективності віконних конструкції і їх використання для відбудови пошкоджених війною будівель України (договір №208/0172 конкурсу НФД України).

Для дослідження і реалізації інноваційних науково-технічних заходів із підвищення енергоефективності будівель було розроблено і збудовано на території Інституту технічної теплофізики НАН України унікальний експериментальний будинок (далі - будинок) пасивного типу як повномасштабний науково-дослідний стенд для вивчення теплофізичних властивостей перспективних теплоізоляційних будівельних матеріалів в реальних умовах їх експлуатації; будівельних фасадних конструкцій із них та інноваційних систем енерго(ресурсо)забезпечення. Загальна опалювана площа становить 306 м^2, тобто це аналог привабливого котеджу для середнього класу населення. Будинок та його автоматизовані інженерні системи автономного енергозабезпечення облаштовані численними датчиками (температури, теплового потоку, вологості, тиску, лічильниками енергії, тощо) та системою неперервних автоматизованих діагностичних вимірювань і архівування параметрів стану (скважність - раз в 1…10 хвилин). Діагностика експлуатації будинку впродовж 11 років показала, що експериментальні питомі тепловтрати через стінові фасади будинку при температурі довкілля -10 ^{o}C становлять лише 1,2–1,8 Вт/м^2. а опір теплопередачі стінових фасадних конструкцій становить до 11,5 м^2·К/Вт, що в 3,3 рази вище нині діючих вимог ДБН В.2.6-33:2018. Опір теплопередачі світлопрозорих конструкцій зріс до 2,0 м^2·К/Вт, що в 2,2 раз перевищує діючий норматив. Питоме річне теплоспоживання такого пасивного будинку становить 14,8 кВт·годин/(м^2·рік) при температурі -1,1 ^{o}C (нормативна середня температура опалюваного періоду для клімату м. Києва) Зазначимо, що в ЄС при значно сприятливішому кліматі

пасивний будинок споживає 15 кВт·годин/(м^2·рік). Для опалення та гарячого водопостачання використовується теплонасосна (6 кВт) акумуляційна низькотемпературна система. В якості низькопотенційної енергії використовується природна та/або закумульована теплота грунту чи води (в водозабірній свердловині). Для цього на територій біля будинку збудований цілий полігон грунтових теплообмінників різної геометрії (горизонтальні неглибокого залягання, вертикальні; трубні багатопетлеві, багатоходові, свердловинні; об'ємні насипні; типу грунт-вода (рідина), грунт-вода-вода, грунт-повітря). Як додаткове джерело теплоти використовуються сонячні теплові колектори (плоскі, трубно-вакуумні). Опалювальними приладами є: теплі водяні підлоги різної геометрії укладки, включаючи капілярну підлогу, тепла стіна, теплий простінок, підлогові та настінні фанкойли. Електропостачання реалізується сонячними BAPV панелями загальною площею 80 м^2 і потужністю 10 кВт (фотомодулі на полікристалічному кремнію та на тонких плівках з телуриду кадмію). Фотовольтаїка доповнена вітроагрегатом «Fortis Montana» потужністю 5 кВт та блоком гелєвокислотних акумуляторних батарей. В будинку облаштована кліматична камера реального клімату, що дозволяє цілорічно проводити діагностику стану вікон, будівельних і теплоізоляційних матеріалів та конструкцій з них.

Для модельного енергоспоживаючого повномасштабного об'єкту бюджетної сфери неперервно, впродовж періоду з 2007 р. і до сьогодні, проводиться моніторинг тепло- і електропостачання, а також діагностика тепловологісного стану адміністративного корпусу ІТТФ НАН України. В цій будівлі створено полігон із 20 різних енергоефективних вікон та полігон із 10 різних теплоізоляційних фасадних покриттів клеєного способу облаштування. На основі багатомільйонних дослідних діагностичних даних, отриманих з використанням сучасних автоматизованих вимірювальних установок, визначено і впроваджено енергоефективні режими енергопостачання, реалізовано раціональні режими примусового зменшення теплоспоживання в разі обмеженої присутності співробітників (період свят, літніх відпусток, пандемії), розроблено 2 «розумних» індивідуальних теплових пунктів, в т.ч. із використанням режиму нічного провалу електроспоживання, оптимізовано витрату фінансів на утримання будівель інституту в цілому. Експериментальні діагностичні дані з експлуатації утеплення стінових фасадів, доповнені модельними дослідженнями, показали збільшення ресурсу життєвого циклу цієї будівлі (проект 1966 р., збудована в 1973 р.) на 20%, а також встановили, що ефект утеплення призводить до зміни деформаційних напружень, зумовлених градієнтом температур, від розтягуючих (стіна без утеплення) до стягуючих (утеплена стіна), що сприяє підвищенню міцності будівлі і її надійності, як теплосприймаючого об'єкта.

Серед отриманих фундаментальних і практичних результатів слід відмітити наступні:

- розрахункові дослідження показали, що для клімату м. Києва для південної орієнтації фасадів будівель за рахунок інсоляції додатково поступає до 30% теплоти, необхідної для опалення;
- застосування клейового утеплення на основі теплоізоляційних матеріалів із високою паропровідністю дозволяє уникнути появи зон конденсації парів води і підвищує ресурс експлуатації будівлі;
- збільшення відстані між стеклами в склопакеті вікна призводить до появи вихорів Релея–Бенара, які впливають на термічний опір конструкції;
- використання для рекуперативної вентиляції канального ґрунтового теплообмінника призводить до того, що повітря на виході із нього має температуру впродовж року в діапазоні від +2 °С до +18 °С при відповідних вхідних температурах в межах від -18 °С (зимою) і до +37 °С (влітку). Така геотермальна вентиляція взимку сприяє системі опалення, а влітку, відповідно, системі кондиціонування. Більш того, на основі природної теплоти ґрунту за допомогою насипних ґрунтових теплообмінників змодельована і реалізована теплова повітряна завіса фасадів і даху будівлі;
- встановлена оптимальна геометрія положення віконної конструкції по товщині віконної пройми.
- показана доцільність встановлення додаткового теплоізоляційного коробу між віконною конструкцією і віконною проймою фасадної стіни;
- енергетичний моніторинг будівель і їх інженерних систем проводився за допомогою мобільної вимірювальної лабораторії та ліцензійних програм ENSI (Норвегія) і AUDYTOR OZC (Польща).

Прикінцево зазначимо. що науковий напрямок **«**Фундаментальна теплофізична інженерія будівель» для теплоенергетики (а для енергетики загалом - фундаментальна енергетична інженерія), який пов'язаний з різними практичними програмами із застосуванням новітніх технологій, може бути основою пріоритетних наукових досліджень і науково-технологічних розробок, спрямованих на створення новітньої конкурентоспроможної науково-технічної продукції, необхідної в умовах воєнного часу, що відповідає ключовим цілям и завданням «Національного плану з енергетики та клімату на період до 2030 року».

Запропонований матеріал є частиною змісту заявки ІТТФ НАН України на проєкт «Фундаментальна теплофізична інженерія для підвищення енергоефективності будівель», поданої на конкурс «Передова наука в Україні 2026-2028» до Національного фонду досліджень України.

УДК 665.7

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ КІЛЬКОСТІ ТА ЯКОСТІ ВИХІДНИХ ПРОДУКТІВ В РЕЗУЛЬТАТІ ПЕРЕРОБКИ ГУМОВИХ ВІДХОДІВ РІЗНИХ ТИПІВ МЕТОДОМ ПІРОЛІЗУ

К. В. Фута[1], С. В. Бойченко[2]

Навчально-науковий Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»
вул. Борщагівська, 115, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (063) 982-04-56, e-mail: f.konstantyn@gmail.com

У роботі розглянуто процес термічної переробки гумових відходів методом піролізу як перспективний напрям у рамках концепції економіки сталого розвитку. Дослідження спрямоване на порівняльний аналіз двох типів сировини — автомобільних шин і гумових деталей транспортних засобів. Представлено технічні характеристики вихідного матеріалу, умови проведення піролізу та кількісний і якісний склад отриманих продуктів.

Ключові слова: *гумові відходи, переробка, піроліз, піролізна рідина, вуглець.*

COMPARATIVE ANALYSIS OF QUANTITY AND QUALITY OF OUTPUT PRODUCTS FROM PYROLYSIS OF DIFFERENT TYPES OF RUBBER WASTE

K. Futa[1], S. Boichenko[2]

Educational and scientific institute of energy saving and energy management,
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
115 Borschagivska str., Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (063) 982-04-56, e-mail: f.konstantyn@gmail.com

The paper explores the thermal processing of rubber waste via pyrolysis as a promising direction within the framework of the sustainable development economy concept. The study focuses on a comparative analysis of two types of raw materials — automobile tires and rubber components of vehicles. Technical characteristics of the initial material, the conditions for pyrolysis, and the quantitative and qualitative composition of the obtained products are presented.

Key words: *rubber waste, recycling, pyrolysis, pyrolysis liquid, carbon.*

ORCID: [2]0000-0002-2489-4980

У контексті постійно зростаючого обсягу відходів та необхідності впровадження принципів циркулярної економіки, питання переробки гумових матеріалів, зокрема шин та інших гумотехнічних виробів, потребує особливої уваги. Одним з перспективних рішень є термічна переробка гумових відходів методом піролізу [1]. Цей підхід дозволяє отримувати корисні вторинні продукти – рідке паливо, газову фракцію та технічний вуглець.

Ефективність піролізного процесу значною мірою залежить від типу вихідної сировини, умов проведення процесу та особливостей застосованого обладнання. Вивчення кількісних і якісних показників отриманих продуктів дозволяє оцінити доцільність переробки різних гумових відходів та визначити оптимальні технологічні параметри.

Метою даної роботи є дослідження та систематизація інформації стосовно сучасних підходів і технологій в області переробки гумових відходів методом піролізу. Для аналізу необхідних показників продуктів переробки потрібно розглянути умови проведення процесу. Після чого порівняти отримані результати для вибраних типів відходів задля можливості подальшого корегування технологічних аспектів виробництва.

Для проведення порівняльного аналізу кількості та якості вихідних продуктів піролізу гумових відходів було обрано два типи сировини: автомобільні шини — використані шини легкових та вантажних автомобілів, з мінімальними залишками від сталевих кордів; гумові деталі автомобіля — ущільнювачі, прокладки, гумові манжети та інші деталі. Для проведення дослідження використовувалась установка періодичної дії з герметичним сталевим реактором. Умови: т-ра 550 ± 10 °C, швидкість нагріву: 10 °C/хв, тривалість 90 хв, середовище безкисневе (азот).

Кількість та якість кожної фракції визначалися за допомогою стандартних методів: масова частка, елементний склад, спектроскопічний та хроматографічний аналіз. Автомобільні шини продемонстрували вищий вихід рідкої (45%) та твердої фракцій (35%). В той час як гумові деталі утворили більший відсоток газоподібного продукту (33%). Це пояснюється різним складом сировини: шини містять більше вуглеводневої основи та оліфінів, а допоміжні деталі — більше додаткових наповнювачів, сірки.

Рідка фракція. Хімічний аналіз рідкої фракції показав наявність у складі переважно вуглеводнів, включаючи широкий спектр ароматичних (бензол, толуол та ксилол) та аліфатичних сполук [2] (див. табл. 1). Піролізна рідина із шин характеризується вищою теплотворною здатністю (~42 МДж/кг) і меншим вмістом сірки (~0,9%), порівняно з рідиною, отриманою з гумових деталей (теплотворна здатність ~37 МДж/кг, вміст сірки ~1,4%). Можна виділити, що рідка фракція обох зразків містить лимонен - важливий інтермедіат у хімічній промисловості.

Таблиця 1. Основні сполуки рідкої фракції

Компонент	**Автошини, %**	**Гумові деталі, %**
Лимонен	4.3	1.7
Бензол	11.2	14.5
Толуол	6.7	8.3
Ксилоли (о-, м-, п-)	4.4	6.2
Аліфатичні алкани	17.5	15.3
Циклопарафіни	3.2	4.1

Тверда фракція. Складається переважно з вуглецю та неорганічних домішок, таких як сірка та оксиди металів [3]. Потенційне застосування – наповнювач для гумових виробів, у різного типу фільтраційних системах, інших промислових процесах. Залишок від шин має більш виражену пористу структуру, та меншу кількість сірки, що є його перевагами. У той час як залишок від гумових деталей автомобіля містить більше мінеральних домішок.

Газоподібна фракція. Містить в основному метан, етилен, пропан та інші легкі вуглеводні. Згідно з дослідами, переробка пірозним методом автомобільних шин, так само як і гумових деталей автомобіля, дає газоподібну фракцію з вмістом метану до 40%. Цей газ може бути використаний для енергозабезпечення процесу піролізу.

Таблиця 2. SWOT-аналіз піролізу обраних гумових відходів

Категорія	**Автомобільні шини**	**Гумові деталі автомобіля**
Сильні сторони	Високий вихід рідини, краща якість вуглецю	Кращий газовий потенціал
Слабкі сторони	Потреба у видаленні металів	Більше золи, сірки у продуктах
Можливості	Регенерація техвуглецю, отримання лимонену	Переробка мілких міксованих гумових відходів
Загрози	Нерівномірність складу різних шин, домішки металу	Ускладнене сортування, наявність сторонніх домішок

Висновки. Проведене дослідження показало, що хімічний склад сировини безпосередньо впливає на вихід і якість продуктів піролізу. Автомобільні шини продемонстрували в цілому кращі результати – більший вихід та вищу теплотворну здатність рідкої фракції, кращі характеристики технічного вуглецю. Тоді як гумові деталі забезпечили більший вихід газоподібних компонентів. Результати також свідчать про можливість подальшої оптимізації технологічних параметрів процесу (температурні режими, тривалість, якість конденсації, та інше) з метою підвищення енергоефективності та зменшення екологічного навантаження.

ПОСИЛАННЯ

1. W. Han, D. Han, H. Chen, "Pyrolysis of Waste Tires: A Review," Polymers, vol. 15, no. 7, p. 1604, Mar. 2023.
2. A. V. Lozhechnik, V. V. Savchin, "Technology of rubber waste treatment," in Proc. Annual Conf. of Young Scientists on Energy Issues, CYSENI 2014, Kaunas, Lithuania, 2014
3. J. F. González, J. M. Encinar, J. L. Canito, J. J. Rodríguez, "Pyrolysis of automobile tyre waste. Influence of operating variables and kinetics study," J. Anal. Appl. Pyrol., vol. 58–59, pp. 667–683, 200

УДК 621.311.25 УДК 621.316.1.052.6:696.6-1; 621.311(075.8)

СИСТЕМИ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД З ПОЛІГЕНЕРАЦІЄЮ

В. В. Каплун

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна,
тел.: (050) 358-11-43, e-mail: kaplun.v@nubip.edu.ua

Дослідження присвячене теоретичному та практичному обґрунтуванню принципів формування систем комбінованого електропостачання з пілігенерацією. Запропоновані структурні моделі формування локальних мікроенергетичних систем, які сприятимуть розвитку енергетичної незалежності територіальних громад шляхом виробництва їх енергії на основі використання локальних видів біопалива та відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: *територальна громада, системи з полігенерацією, відновлювані джерела, комбіноване енереговиробництво.*

ENERGY SUPPLY SYSTEMS OF TERRITORIAL COMMUNITIES WITH POLYGENERATION

V. Kaplun

National University of Life and Environmental of Ukraine,
15, Heroiv Oborony st., Kyiv, Ukraine, 03041
phone: (050) 358-11-43, e-mail: kaplun.v@nubip.edu.ua

The study is devoted to the theoretical and practical substantiation of the principles of formation of a system of combined power supply with polygeneration. Structural models of formation of local micro-energy systems, which will contribute to the development of energy independence of territorial communities through the production of their energy on the basis of the use of local types of biofuels and renewable energy sources, are proposed.

Key words: *territorial community, micro-energy system, renewable sources, thermal generation on biofuel, combined non-energy production.*

RCID: 0000-0001-7040-9344

Швидке розгортання розподілених енергетичних ресурсів та формування енергонезалежних територіальних громад призвели до пошуку нових рішень для побудови технологічних структур з використанням біомаси та відновлюваних джерел. Особливою проблемою в оцінці енергетичного балансу комбінованих енергетичних систем (КЕС) цього класу є визначення шляхів формування ефективної схеми ціноутворення, яка створить додаткові переваги для кінцевих споживачів. У цій статті представлено аналіз методології динамічного ціноутворення локального комбінованого електропостачання для стимулювання розвитку локальної генерації електроенергії.

Локальний енергетичний вузол включає локальні гетерогенні джерела мережевого рівня: сонячну електростанцію (SPP), вітрову електростанцію (WPP), теплову електростанцію на твердому біопаливі (HPP), біопаливну когенераційну газопоршневу установку (BCP) та централізовану систему електропостачання (CPSS). Необхідно обґрунтувати таку технологічну структуру REC, яка б забезпечувала покриття попиту з найнижчою вартістю виробництва електроенергії на основі доступних локальних видів біопалива та ВДЕ.

Припустимо, що всі джерела енергії розподілені, тобто потоки енергії передаються різним кінцевим споживачам, підключеним до мережевої інфраструктури. У цьому випадку розглядається однорідно розподілена мікромережа, в якій кожен кінцевий споживач має можливість отримувати енергію від усіх вибраних джерел мікроенергетичної системи в досліджуваному інтервалі часу $t_{i1} = t_{i2} = \cdots t_{im} = t_i$, для всіх $i = \overline{1,n}$.

У загальному випадку цільова функція для і-ї технологічної структури КЕС матиме вигляд:

$$min\ obj_i = \sum_{t=1}^{T} g_{SES} \cdot W^e_{SES} + g_{WES} \cdot W^e_{WES} + g^e_{CHPS} \cdot W^e_{CHPS} + g^e_{BCP} \cdot W^e_{BCP} \ + g^e_{CPSS} \cdot W^e_{CPSS} + g^h_{HG} \cdot W^h_{HG} + g^h_{CHPS} \times W^h_{CHPS} + g^h_{BCP} \cdot W^h_{BCP} \quad (1)$$

де $g^{e,h}_{*}$грн/кВт·год – питомі собівартості кінцевих користувачів видів енергії (*e*- електричної, *h* – теплової);

$W^{e,h}_{*} = P^{e,h} + E \cdot t$, кВт·год – кількість енергії (відповідно електричної і теплової), яка генеруватиметься у CHPS для покриття навантаження; $E \cdot t$ – енергія взаємної конверсії первинних палив в кінцеві види енергії користувача.

Для розрахунку питомих вартостей електроенергії і тепла в CHPS скористаємось спрощеним розрахунком за формулами (для *i*-го місяця):

$$g^e_{CHPS} = \frac{A_i + B_i + C_i + D_i}{W^h_i} \cdot \eta^e(\%); \quad (2)$$

$$g^h_{CHPS} = \frac{A_i + B_i + C_i + D_i}{W^h_i} \cdot \eta^e(\%); \quad (3)$$

де A_i – питомі капітальні видатки, віднесені на весь розрахунковий період експлуатації);

B_i – витрати первинного палива на технологічний цикл за календарний місяць;

C_i – річні накладні витрати;

D_i – непередбачувані витрати, викликані зупинкою енерговиробництва;

$\eta_i(\%)$ – коефіцієнт використання базової потужності агрегата CHPS для виробництва електроенергії і тепла у місячному циклі.

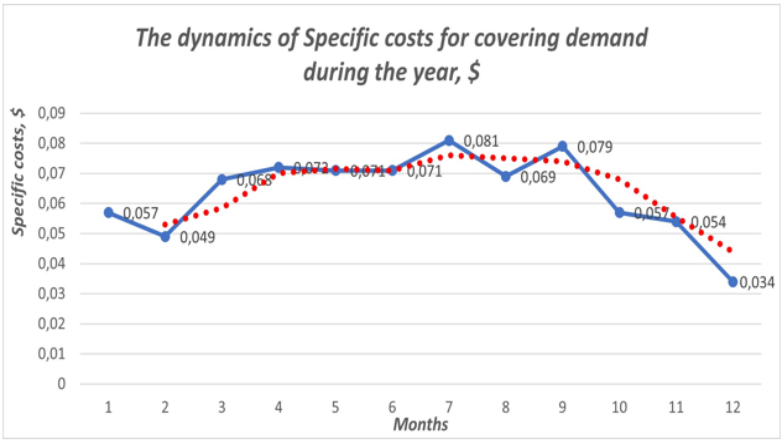


Рис.1. Динаміка змін питомих витрат ($) впродовж календарного року

Моделювання структури обраних джерел показало значну еластичність загальних витрат та питомої вартості електропостачання в межах директивно встановленого попиту до сезонності роботи джерел з комбінованим енерговиробництвом. Слід звернути увагу на те, що, розглядаючи збіжність результатів індуктивного комбінаторного алгоритму, спостерігається збільшення споживання електроенергії із зовнішньої електромережі та збільшення вартості енергопостачання в опалювальні періоди. Перш за все, це пояснюється незначною участю відновлюваних джерел (перш за все НРР та локальних теплових електростанцій на біопаливі (CHPS,BCP) у покритті попиту. Очевидно, що для пошуку оптимальних рішень щодо енергопостачання територіальних громад необхідно розглянути кілька технологічних структур КЕС з різними співвідношеннями встановлених потужностей відновлюваних джерел та біопаливних електростанцій.

Показовим з точки зору оцінювання енергоефективності та формування собівартості енергії (теплової і електричної) для кінцевих споживачів є причини, які обумовлюють втрати, пов'язані з конверсією первинних біопалив у джерелах теплової генерації. Саме сезонність накладає суттєві обмеження на використання НРР та ВСР у літній період навіть без урахування можливих маневрових режимів.

Територіальні громади мають об'єктивні перспективи щодо формування своєї енергетичної незалежності, створюючи власні інфраструктурні об'єкти з енерговиробництва на місцевому рівні. Саме джерела комбінованого енерговиробництва з високою паливною ефективністю та здатністю маневрувати потужністю у широкому діапазоні навантажень будуть найбільш витребуваними з огляду на забезпечення мінімальних вартостей теплової та електричної енергії з підтримкою стохастичного режиму генерації ВДЕ.

ПОСИЛАННЯ

1. The European Green Deal – Delivering the Eu's 2030 Climate Targets. Available online: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_23_4813.
2. Kaplun, V. (2023). PRINCIPLES OF RESOURCE-PROCESS MODELING OF TERRITORIAL COMMUNITIES COMBINED ENERGY SUPPLY IN THE CLIMATE CHANGE PREVENTION CONTEXT. System Research in Energy, (4 (75), 54-64. https://doi.org/10.15407/srenergy2023.04.055
3. Ghiani E. et.al. (2019), Planning of a smart local energy community: the case of Berchidda Municipality (Italy), Energies, 12, (24):4629, December 2019
4. Kaplun, V., Osypenko, V. Energy Efficiency Analyses in Polygeneration Microgrids with Renewable Sources 2020 IEEE 7th International Conference on Energy Smart Systems, ESS 2020 - Proceedings, 2020, pp.139–143.

УДК 621.311.25

ПОРТАТИВНИЙ ЗАРЯДНИЙ КОМПЛЕКС

Д. О. Піжик

Славутський ліцей Хмельницької обласної ради,
вул. Кн. Сангушків 8 , м. Славута, 30000, Україна,
тел.: (093) 127 90 56, e-mail: зшяшлв0409@gmail.com

При розв'язанні поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення фізичних, хімічних властивостей низькокиплячих робочих тіл та їх собівартості.

Ключові слова: *стабілізатор напруги, електричний генератор, редуктор, обертальна ручка, велосипедне кріплення, монтажний корпус.*

На теперішній час, жителі України дуже часто стикаються з проблемою відсутності електроенергії, спричиненими військовими діями. А під час походів на природу, надзвичайних ситуаціях, відпочинку на дачі, можливість підключення до електричних мереж буває взагалі неможливе. Для вирішення цієї проблеми можна використати портативний зарядний комплекс, як аварійне джерело живлення для заряджання мобільний телефонів, ліхтарика, павербанків, електроінструментів. Ідея портативності пристрою полягала в тому, щоб можна було використовувати для обертання ротора генератора різні обертальні процеси: механічне обертання ручки людиною; обертання колесом під час їзди на велосипеді та компактне розміщення елементів у невеликій коробці.

Для того щоб здійснити терміновий дзвінок потрібно крутити ручку генератора приблизно 2-3 хвилини. Для повного заряджання акумулятора потрібно обертати генератор від 2 до 5 годин, залежить від ємності та ступеню заряду акумулятора, який заряджають. Проте, якщо ви їдете на велосипеді, заряджання акумуляторів буде набагато приємнішим і зручнішим.

Перевага «Портативного зарядного комплексу» над подібними пристроями в тому, що він може використовувати енергію отриману від обертання ручки людиною, енергію від рухомого колеса велосипеда та є досить компактним у розміщенні складових елементів. У розробленій моделі застосовуються комплектуючі та матеріали, які розповсюджені в Україні. Приблизна загальна ціна витратних матеріалів близько 700 грн., повна маса установки 2,2 кг.

ПОСИЛАННЯ

1. Бойко В.С. Теоретичні основи електротехніки: підручник у 3-х томах / В.С. Бойко, В.В. Бойко, Ю.Ф. Видолоб та ін. [За заг. ред. І.М. Чиженка, В.С. Бойка] – К.: Видавництво “Політехніка”, 2004. – 272 с.: іл.
2. Загірняк М.В. Електричні машини: підручник / М.В. Загірняк, Б.І. Невзлін. – 2-ге вид., переробл. і доповн. – К. Знання, 2009. – 399 с.
3. Півняк Г.Г., Шкрабець Ф.П., Довгань В.П. Електричні машини. Навчальний посібник –Дніпропетровськ, Видавництво Національного гірничого університету, 2003, -331 с.
1. 4.https://all-parts.in.ua/ua/ruchnoy-generator-s-rukoyatkoy-12-24-v-postoyannogo-toka-14874104936.html?srsltid=AfmBOoorKhD3X6-jcEcQ0SsnUINaWCnSMmpewvtUQZU8A2SlDCrjodm4
4. https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=5acyaetOcHw
5. https://www.joom.com/uk/search/c.1597236625133097638-26-2-2-1970885115
2. 7.https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/znyzhuvalnyi-rehuliator-napruhy-dysplei-voltmetr-lm2596_79522.html

УДК 621.311.25

РОЗРОБКА АВТОНОМНИХ ЕЛЕКТРОГЕНЕРУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ

І. Ю. Папаїка

Дніпровський ліцей №67 "Джерело", м. Дніпро, Україна, тел.: (099) 207-36-93, e-mail: papaikaigor09@gmail.com

Анонс проєкту: *Ідея децентралізованих енергетичних рішень для допомоги об'єктам соціального призначення (наприклад, для аварійного живлення або зменшення витрат на комунальні послуги електропостачання та економії коштів) і доцільності (економічного ефекту) з використання фотоелектричної (сонячної) електроенергії в Україні не є новою, але в умовах сучасних реалій це набуває нового змісту. Даним проєктом обґрунтована доцільність будівництва на даху школи фотоелектричної станції з можливістю накопичення енергії. Гібридний, інвертор, обраний у проєкті, дозволяє реалізувати рівні сценарії генерації, накопичення та споживання електричної енергії обєктами критичної інфраструктури школи. Також запропонована реалізація концепції "Активний споживач", як одне з ключових рішень транформації енергетики України в ресурсно-незалежну систему.*

Мета: *Знаходження оптимального рішення для побудови гібридної автономної системи електропостачання накопичувального типу для Дніпровського ліцею №67 «Джерело» ДМР, оптимізація споживання електроенергії з мережі для зниження споживання закладом, а також розробка прототипу цієї системи для перетворення та накопичення електричної енергії у гібридних системах електропостачання.*

Актуальність: *Робота присвячена аналізу проблематики та пошуку технічних рішень створення гібридних систем електропостачання об'єктів соціальної інфраструктури (навчальних закладів) з гарантованим живленням об'єктів критичної інфраструктури при нестабільному електропостачанні та блекаутах, що обумовлює актуальність досліджень.*

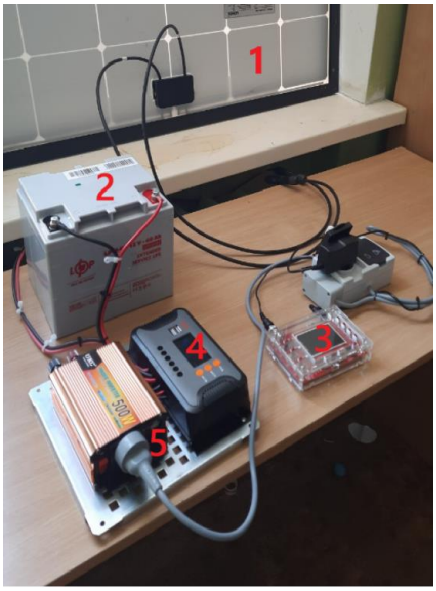
Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, фотоелектрична станція, інвертор, активний споживач, акумулятор.*

Запропонований проєкт складається з:

1. Фотоелектричних модулів на даху школи
2. Прокладки кабельно-провідникової продукції для реконструкції існуючої системи електропостачання
3. Вибору автоматичних вимикачів для комутації та захисту
4. Вибору ємності Storage-системи виконано з обґрунтуванням тривалості безперервного електропостачання укриттів та засобів комунікації.

Етапи проєкту:

1. Характеристика об'єкту споживання та вибір обладнання
2. Розрахунок продуктивності ФЕС
3. Розрахунок вартості капітальних інвестицій та експлуатаційних витрат
4. Оцінка впливу на навколишнє середовище



Практична частина:

Дана лабораторна установка складається з:

1. Фотоелектричного генеруючого модуля - сонячної панелі.
2. Накопичувача енергії у вигляді гелевого акумулятора
3. Портативного осцилографа для дослідження параметрів споживання електроенергії
4. Контролера заряду для правильної зарядки акумулятора
5. Однофазного інвертора для перетворення постійної напруги 12 вольт у змінну 220 вольт

Рівень завершеності проєкту: Виконано проєкт на основі реальних досліджень графіків електричних навантажень. В кабінеті фізики створено

прототип фотоелектричної станції з можливістю досліджень. Цей освітній проєкт може допомогти здобувачам освіти отримати знання про сонячну енергетику, її користь та механізми роботи.

Висновки:

1. Основна частина даного проєкту присвячена обґрунтуванню вибору структури та технологічних рішень гібридної системи електропостачання навчального закладу. Вибір потужності ФЕМ та інвертора виконано на основі досліджень реальних параметрів режиму електроспоживання об'єктів критичної інфраструктури школи (освітлення, опалення та вентиляція укриттів, аварійна сигналізація та Internet-зв'язок).
2. Моделювання місячних графіків генерації дахової ФЕС протягом року виконано у професійному програмному середовищі HelioScope з урахуванням географічного розташування станції, кліматичних умов, особливостей обраних фотоелектричних модулів.
3. Для швидкого та ефективного приєднання дахової ФЕС з накопичувачами в існуючу систему електропостачання школи запропоновано сучасні рішення з реконструкції розподільчих пристроїв напругою 0,4 кВ, виконано вибір автоматичних вимикачів, кабельних ліній та пристроїв автоматизації.
4. Проаналізовано можливості програмування гібридних інверторів Deye, що дозволяє застосувати різноманітні алгоритми генерації, перетворення та обміну енергії між централізованою системою, ФЕС та Storage-системою. Найбільш інвестиційно привабливими є рішення з застосуванням зонних тарифів на електроенергію з мінімізацією споживання електроенергії у часи пікових навантажень енергосистеми.
5. У економічному розділі даної роботи виконано техніко-економічні розрахунки (капітальні та експлуатаційні витрати) на спорудження ФЕС на покрівлі будівлі школи. При використанні тарифів на електроенергію, диференційованих за часом доби, річна економія складе 754 тис. грн. Враховуючи особливий графік функціонування навчальних закладів (тривалі канікули у літній період), що поєднується з найбільшими об'ємами генерації електроенергії від ФЕС, запропоновано застосування політики «Активний споживач», що передбачає генерацію енергії від ФЕС у електричні мережі енергосистеми влітку та споживання у зимовий період, коли рівень сонячної інсоляції значно знижений. Такий підхід вигідний як навчальному закладу, так і постачальникам послуги з електропостачання.
6. Виконано оцінку впливу на навколишнє середовище при будівництві та експлуатації ФЕС на покрівлі школи. Проаналізувавши вимоги нормативно-правових документів з екології, показано, що негативного впливу на атмосферу, водне, тваринне та рослинне середовище не відбувається.

Інноваційність цього проєкту полягає у врахуванні особливостей електричних навантажень, притаманних навчальному закладу, які були зафіксовані шляхом експериментального моніторингу параметрів електричної енергії. Це дало можливість застосувати концепцію "Активний споживач" з максимальною ефективністі

ПОСИЛАННЯ

1. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: монографія / За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. – Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2016. – 400 с.
2. Стійкість режиму енергосистеми з розподіленою генерацією: навчальний посібник / О.В. Кириленко, Г.Г. Півняк, О.О. Азюковський, Ю.А. Папаїка, І.М. Луценко ; за ред. Г.Г. Півняка; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро: Грані, 2024. – 243 с.
3. Закон України Про Енергетичну ефективність (https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text).
4. Розпорядження Кабінету Міністрів України Про схвалення Концепції впровадження "розумних мереж" в Україні до 2035 року.

УДК 621.311

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАГУВАННЯ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГОМЕРЕЖІ НА ЧАСТОТУ В ГІБРИДНІЙ ЕНЕРГОМЕРЕЖІ З ВДЕ ШЛЯХОМ ДОДАВАННЯ ВІРТУАЛЬНОЇ УЗЕ

С. В. Хомутов

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
phone: (050) 3857056, e-mail: sergii.khomutov@gmail.com

Моделювання реакції об'єднаної енергомережі (ОЕМ) на зміни частоти в гібридній енергомережі, що поєднує традиційну генерацію, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) шляхом додавання віртуальної УЗЕ з різними параметрами. Аналітика охоплює оцінку стійкості, розширений аналіз профілю частоти, ROCOF, спектральні характеристики, а також застосовується для дослідження поведінки систем накопичення енергії (УЗЕ) та визначення ролі ВДЕ у регулюванні частоти в ОЕМ та вивчення поведінки системи при ізольованій роботі.

Ключові слова: *комбіновані енергомережі з ВДЕ, моделювання, острівний режим, ROCOF, спектральний аналіз, мертва зона, MATLAB, ВДЕ, УЗЕ.*

MODELING OF THE ISLAND MODE OF A HYBRID RENEWABLE ENERGY SYSTEM

S. Khomutov

Institute of Renewable Energy Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
50 Metrologichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (050) 3857056, e-mail: sergii.khomutov@gmail.com

Modeling the Response of the Power Grid to Frequency Deviations in a Hybrid Energy Network Combining Conventional Generation and Renewable Energy Sources (RES) via the Addition of a Virtual BESS with Variable Parameters.

The analytics cover stability assessment, extended frequency profile analysis, RoCoF (Rate of Change of Frequency), spectral characteristics, and are also used to study the behavior of Battery Energy Storage Systems (BESS) and the role of RES in frequency regulation within the IPG, including performance during islanded operation.

Key words: *hybrid power grids with RES, modeling, island mode, RoCoF, spectral analysis, deadband, MATLAB, RES, BESS.*

ORCID: 0009-0000-4067-7671

Розглядається метод моделювання реакції об'єднаної енергомережі (ОЕМ) на зміни частоти [1] в гібридній енергомережі, що поєднує традиційну генерацію, відновлювані джерела енергії (ВДЕ) шляхом додавання віртуальної УЗЕ з різними параметрами. Створено програмний інструмент у середовищі MATLAB для аналізу реакції ОЕМ на відхилення частоти відповідно до заданого статизму, мертвої зони, заданої потужності, ємності та початкового SOC. Аналітика охоплює оцінку стійкості, розширений аналіз профілю частоти, ROCOF, спектральні характеристики, а також застосовується для дослідження поведінки систем накопичення енергії (УЗЕ) та визначення ролі ВДЕ у регулюванні частоти в ОЕМ та вивчення поведінки системи при ізольованій роботі [3].

Збільшення проникнення ВДЕ в енергосистему зменшує інерційні характеристики ОЕМ, що знижує здатність системи демпфувати частотні коливання. Це робить важливим дослідження реакції ОЕМ на короткочасні та тривалі частотні збурення. Додатково актуальним є вивчення здатності ВДЕ підтримувати частоту у співпраці з системами зберігання енергії в умовах острівного режиму [2] [4] [5].

Модель базується на таких параметрах:

- максимальна потужність реакції ОЕМ (MW);
- мертва зона частоти (Hz); статизм (Hz/100%);
- початковий SoC (%); «віртуальна» ємність (MW·h), що імітує гнучкість ОЕС.

Обробляється піврічний часовий ряд частоти з часовим кроком 1 с наданий Укренерго [1]. При відхиленні частоти від номінального значення активується реакція (виробництво або споживання) з обмеженням по потужності та SoC. Моделюється накопичення енергії у відповідь на збурення.
Використуються наступні аналітічні блоки:

1. Показники реакції ОЕМ:

- кількість повних циклів заряду-розряду; тривалість перебування у граничних станах (0% або 100%); оцінка мінімально необхідної потужності та ємності для уникнення досягнення меж SoC; індекс стійкості (Battery Stability Score), який також може бути використаний для УЗЕ.

Результати симуляції та аналітика
Вихідні дані:
==== BESS Frequency Response Modeling 2====
1. Enter P_max BESS (MW): 5
2. Enter Maximum Battery Capacity (MW·h): 10
Результати симуляції та аналітика
Full cycles (by extreme transitions): 7
Reached 100% SoC: 128 times, duration 7699.03 min
Reached 0% SoC: 299 times, duration 25030.83 min
Detected 13 full roundtrip cycles
Average roundtrip cycle duration: 11 days 12 hours 17 min
Що показує що УЗЕ досягає стану 0% в 1.79 разів частіше ніж заряджається до 100% в автономному режимі.

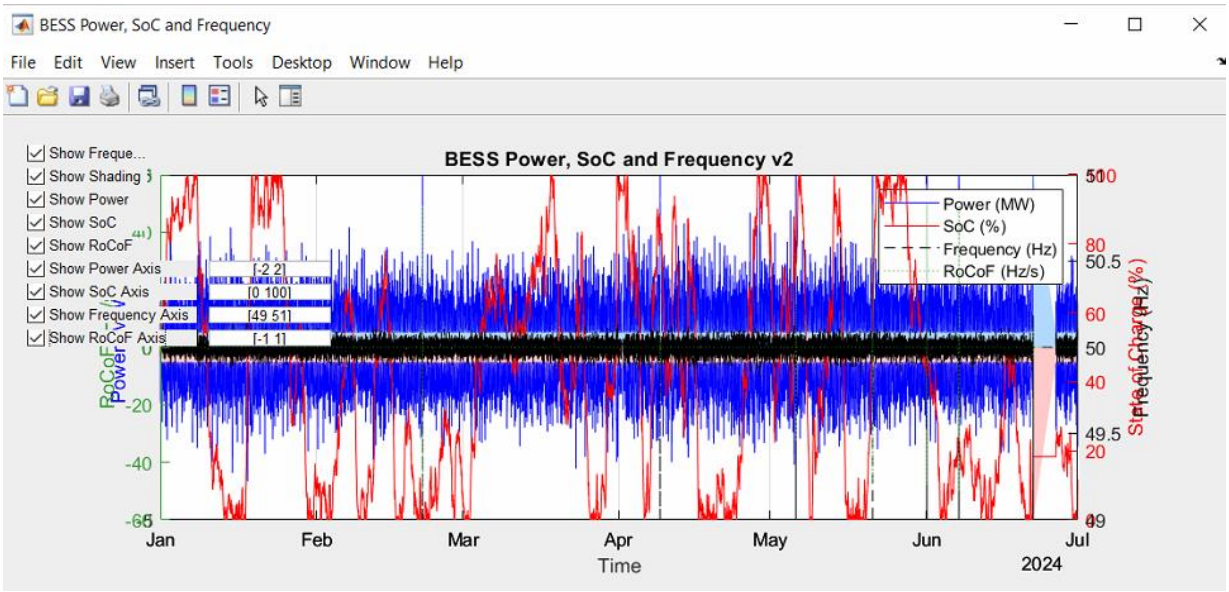


Рис. 1. Загальний графік з реакцією потужності на стану заряду на зміни частоти

2. Частотна аналітика:

- Найменші та найбільші значення частоти (з урахуванням допустимих меж);
- Розподіл частоти за регуляторними зонами (47–47.5 Гц, 47.5–49.0 Гц, тощо) згідно з нормативами КСП (табл. 4, 15, 18, 26);
- Тривалість неперервного перебування в зонах з вимогою щонайменше 30 хвилин;
- Аналіз порушень нижніх граничних значень (нижче 47.0 Гц).

Результати симуляції та аналітика
=== Frequency Band Duration Analysis ===
49.8 - 50.2 Hz : 15689139.00 sec (261485.65 min)
47.0 - 47.5 Hz : 1.00 sec (0.02 min)
49.0 - 51.0 Hz : 15689141.00 sec (261485.68 min)

3. Аналіз RoCoF (Rate of Change of Frequency):

- Мінімальний, максимальний, середній RoCoF;
- Графік RoCoF по часу для виявлення пікових моментів збурень.

Результати симуляції та аналітика

=== Continuous Presence in Frequency Zones ===
Zone 49.8 - 50.2 Hz: 8 long events (>=30 min) RoCoF Max: 0.1884 Hz/s, Spectral Entropy: 20.4923
Zone 49.0 - 51.0 Hz: 8 long events (>=30 min) RoCoF Max: 0.7171 Hz/s, Spectral Entropy: 20.5151

4. Settling Time:

- середній час повернення частоти в мертву зону; кількість подій, що вийшли за мертву зону; кількість подій з відновленням у межах нормативів.

5. Автокореляція:

- побудова функції автокореляції; виявлення повторюваних добових або погодинних шаблонів частоти.

Результати симуляції та аналітика

Спостерігається згасаюча автокореляція

6. Спектральний аналіз:

- амплітудно-частотний спектр частоти; виявлення гармонік та домінуючих частот коливань:

Результати симуляції та аналітика

Спектральний центр: 0.1280 Гц

Висновки

Розроблена модель та комплексна аналітика забезпечують глибоке розуміння частотної динаміки в умовах гібридної енергосистеми. Дані є корисними для:

- проектування систем зберігання енергії (УЗЕ) в умовах нестабільної частоти,
- прогнозування реакції ВДЕ у режимах регулювання,
- перевірки відповідності системи регуляторним вимогам,
- створення стратегій для острівної роботи.

Результати можуть бути застосовані в реальному часі для моніторингу, а також у процесах оптимізації конфігурацій мережевих або автономних мікромереж.

Результати моделювання базуються на піврічному часовому ряді, включають повний цикл аналітики, збережені у *.mat-файлі та візуалізовані через графіки, що охоплюють Power, SoC, Frequency, RoCoF, Autocorrelation та Spectrum.

З результатів аналітики видно що УЗЕ з параметрами відношення емності до потужності 1:2 не вистачає для автономного існування та потрібна периодична зупинка для відновлення емності.

Оптимальна емність та/або периодичность зупинки також може бути виявлено шляхом наданного моделювання.

ПОСИЛАННЯ

1. https://ua.energy/dopomizhni-poslugy/#1723731737254-6ae24d13-791b Посекундні значення частоти виміряні WAMS на підстанціях НЕК «Укренерго» . 2024 р.
2. Про затвердження Кодексу системи передачі: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2028 № 309 {Із змінами, внесеними згідно з Постановами Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг № 2649 від 29.12.2023 }. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0309874-18#n1 (дата звернення: 16.02.2024).
3. IEEE Std 1547-2018. IEEE standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power System Interfaces.
4. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.П. Кузнєцов, О.А. Мельник – Електронні текстові дані (1 файл: 7,93 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 304 с.
5. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія / М. П. Кузнєцов. — Київ: ІВЕ, 2022. — 142 с.

УДК 621.31

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ МУНІЦИПАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ В МІСТІ ЗАПОРІЖЖЯ

Карпенко А. В.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

***Анотація**. У статті наведено результати комплексного аналізу технічного забезпечення системи енергомоніторингу муніципальних об'єктів в місті Запоріжжі, яка функціонує на рівні комунальних закладів обласного значення. Окрему увагу приділено опису організаційних і нормативних засад, що визначають побудову та застосування таких систем, а також структурі технічного забезпечення, що охоплює використання сучасних приладів обліку енергоресурсів. Особливе значення має опис процедур збирання, оброблення та аналізу даних про споживання енергоресурсів у реальному часі, що є ключовими елементами для забезпечення прозорості та економії бюджетних коштів. Вивчено проблеми впровадження системи енергомоніторингу, такі як уніфікація приладів обліку, інтеграція різноманітних технологій і необхідність модернізації існуючих інфраструктур. Також визначено важливість підвищення кваліфікації персоналу, що працює з автоматизованими системами, для забезпечення високої точності вимірювань та продуктивності обробки даних. Визначено основні напрямки для розвитку та вдосконалення технологій енергомоніторингу, що дозволяють знизити витрати на енергію та забезпечити усталеність енергоефективних ініціатив у місті. Підсумовано, що вдосконалення системи енергомоніторингу міста Запоріжжя є важливим кроком до досягнення цілей енергозбереження та інтеграції цифрових технологій в управлінні енергоресурсами на рівні громади. Окрему увагу приділено впровадженню цільового показника щорічного скорочення споживання енергії, визначеного відповідно до актуальної методики, що дозволяє формувати стратегічні енергетичні цілі на рівні окремих установ і міста загалом. Також висвітлено ключові напрями подальшого вдосконалення системи, зокрема, охоплення обліком усіх об'єктів, розвиток аналітичних функцій, автоматизацію процесів формування звітності та забезпечення публічної прозорості у сфері управління енергоресурсами.*

***Ключові слова:** енергомоніторинг, технічне забезпечення, комунальні заклади, прилади обліку, енергоефективність, автоматизована система, Запоріжжя.*

ANALYSIS OF TECHNICAL SUPPORT OF THE ENERGY MONITORING SYSTEM OF MUNICIPAL FACILITIES IN THE CITY OF ZAPORIZHYA

Karpenko A.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
115 Borschagivska str., Kyiv, Ukraine, 03056

***Abstract.** The article presents the results of a comprehensive analysis of the technical support of the energy monitoring system of municipal facilities in the city of Zaporizhia, which operates at the level of municipal institutions of regional significance. Special attention is paid to the description of the organizational and regulatory principles that determine the construction and application of such systems, as well as the structure of technical support that covers the use of modern energy metering devices. Of particular importance is the description of the procedures for collecting, processing and analyzing data on energy consumption in real time, which are key elements for ensuring transparency and saving budget funds. The problems of implementing the energy monitoring system are studied, such as the unification of metering devices, the integration of various technologies and the need to modernize existing infrastructures. The importance of improving the skills of personnel working with automated systems is also determined to ensure high measurement accuracy and data processing productivity. The main directions for the development and improvement of energy monitoring technologies are identified, which allow reducing energy costs and ensuring the sustainability of energy efficiency initiatives in the city. It is concluded that improving the energy monitoring system of the city of*

Zaporizhzhia is an important step towards achieving the goals of energy saving and integration of digital technologies in energy resource management at the community level. Particular attention is paid to the implementation of the target indicator of annual energy consumption reduction, determined in accordance with the current methodology, which allows for the formation of strategic energy goals at the level of individual institutions and the city as a whole. Key areas for further improvement of the system are also highlighted, in particular, the coverage of all facilities by accounting, the development of analytical functions, the automation of reporting processes and ensuring public transparency in the field of energy resource management.

Keywords: *energy monitoring, technical support, municipal institutions, metering devices, energy efficiency, automated system, Zaporizhia.*

Вступ. У сучасних умовах підвищеного попиту на енергоресурси, обмеженості природних ресурсів та постійного зростання витрат на енергопостачання, проблема ефективного використання енергії стала однією з пріоритетних для державних органів та місцевих громад. Україна, як і багато інших країн, зіштовхується з викликами, пов'язаними з неефективним споживанням енергоресурсів у комунальному секторі, що спричиняє зайві витрати з бюджетів міст і селищ, а також негативно впливає на екологічну ситуацію в країні. У цьому контексті важливим інструментом для досягнення енергоефективності є система енергомоніторингу, яка дозволяє здійснювати реальний контроль за споживанням енергоресурсів на рівні окремих установ, підприємств та в цілому — на рівні міста. Запровадження централізованих систем енергомоніторингу, що охоплюють різні об'єкти комунальної власності, набуває особливої актуальності. То ж дає змогу органам місцевого самоврядування контролювати та оптимізувати енергоспоживання в освітніх, медичних, адміністративних, культурних та інших закладах, що фінансуються за рахунок місцевих бюджетів. Особливо важливим є питання прозорості в управлінні енергетичними ресурсами, оскільки це дозволяє не лише знижувати витрати, а й сприяє підвищенню рівня енергоефективності, що має пряму позитивну динаміку на економічну ситуацію в регіоні.

Одним із таких прикладів є місто Запоріжжя, яке стало одним з лідерів серед українських міст щодо впровадження та розвитку системи енергомоніторингу муніципальних закладів. Запоріжжя започаткувало централізовану систему моніторингу енергоспоживання на рівні комунальних установ обласного значення, що охоплює понад 550 об'єктів комунальної власності. Це дозволяє оперативно збирати, обробляти та аналізувати дані про споживання енергії, що забезпечує прозорість та ефективне управління енергоресурсами в муніципальному секторі. Завдяки такій системі місцеві органи влади мають змогу своєчасно виявляти перевитрати енергії, відстежувати аномалії в споживанні та вчасно вживати необхідні заходи для коригування витрат.

Запровадження енергомоніторингу є не лише важливим кроком на шляху до досягнення енергоефективності, але й частиною глобальної стратегії з боротьби зі змінами клімату, оскільки зменшення споживання енергії допомагає зменшити викиди парникових газів і покращити екологічну ситуацію в регіоні. Крім того, наявність чіткої системи контролю дозволяє створити основу для подальшої цифрової трансформації публічного управління, що є одним з пріоритетів для розвитку міст України.

Метою дослідження є детальний аналіз технічного забезпечення системи енергомоніторингу муніципальних об’єктів міста Запоріжжя, оцінка ефективності її функціонування та визначення перспектив її вдосконалення і оптимізації процесів збору та обробки даних. Зокрема, аналіз буде зосереджено на технічних аспектах роботи системи, на організації процесу моніторингу та на потенційних напрямках для інтеграції нових технологій, що забезпечать більшу ефективність управління енергоспоживанням.

Матеріали і результати дослідження. Відповідно до розпорядження міського голови № 12р від 12.012023 «Про запровадження системи моніторингу споживання енергоресурсів на об’єктах комунальної власності» [1] у Запоріжжі впроваджено в постійну експлуатацію систему енергомоніторингу. Рішення спрямовано на створення єдиного механізму для моніторингу та контролю енергоспоживання комунальних об'єктів міста. Визначено ключові обов’язки учасників процесу, організовано збирання і оброблення даних, затверджено основні принципи функціонування системи, які містять вимоги до точності, своєчасності та прозорості даних на всіх етапах їхнього формування. Основна мета системи енергомоніторингу – забезпечення ефективного управління енергоспоживанням на комунальних об'єктах міста, запобігання перевитратам енергоресурсів, оперативне виявлення проблем з постачанням або споживанням енергії та моніторинг, що дозволяє приймати зважені рішення щодо енергетичних ресурсів. Технічне оснащення системи енергомоніторингу Запоріжжя охоплює використання сертифікованих приладів обліку енергоресурсів, що відповідають сучасним вимогам щодо точності та надійності. Прилади обліку інтегровано в єдину базу даних, що забезпечує централізований контроль за енергоспоживанням. Система охоплює понад 550 об’єктів, серед яких освітні, медичні та культурні заклади, адміністративні будівлі та інші об'єкти комунальної власності. Для забезпечення точності вимірювань використовуються сучасні моделі лічильників, такі як Sharky 775 для

обліку теплової енергії, NIK 2301 та NIK 2303 для обліку електроенергії, ЛК-15 для обліку води. Станом на 2025 рік у рамках централізованої програми енергомоніторингу міста зареєстровано 916 електролічильників, 321 теплолічильник, 651 лічильник холодної води, а також 8 лічильників природного газу. Це дає можливість здійснювати точний облік споживання енергоресурсів на кожному об'єкті. Зібрані дані передаються в автоматизовану інформаційну систему (АІС), реалізовану через платформу AIC UMUNI [2]. див. рис. 1.

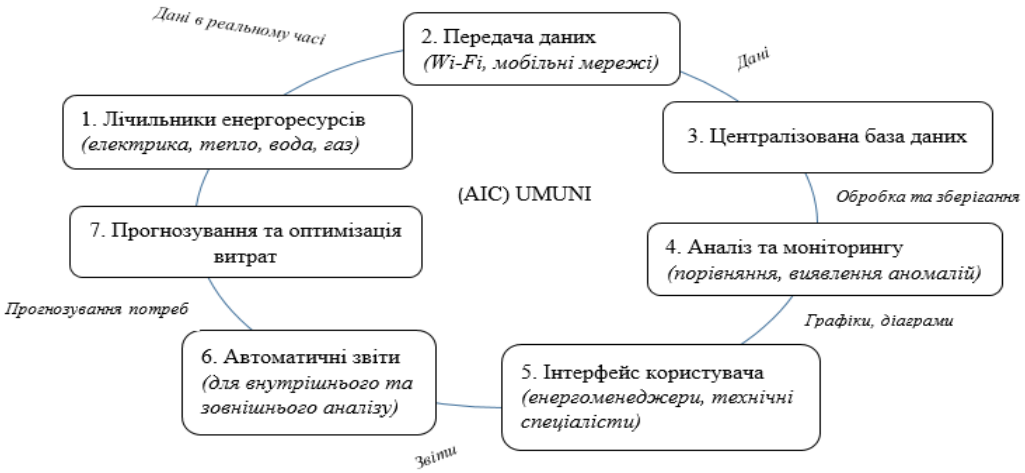


Рис. 1. Типова схема програмного продукту AIC UMUNI для моніторингу енергоресурсів

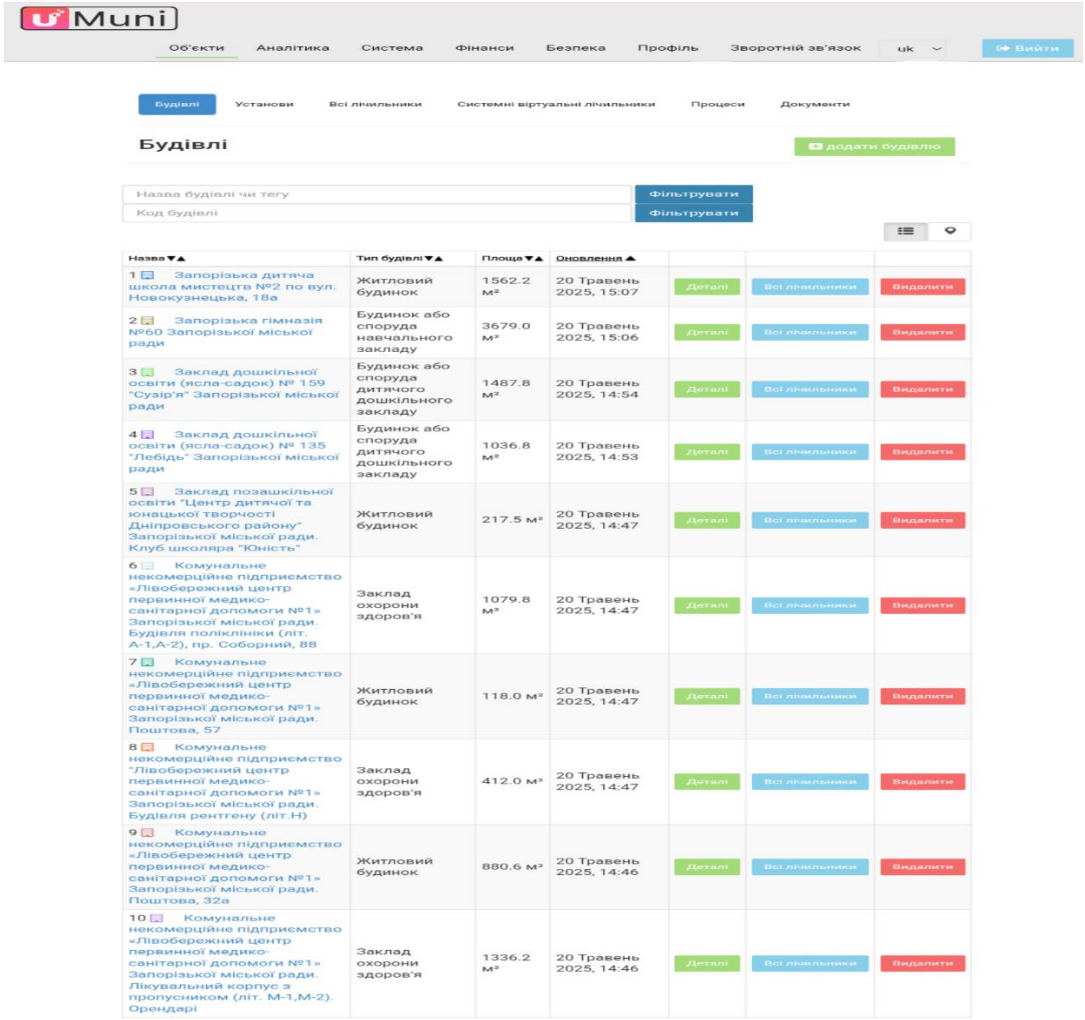


Рис. 2. Інтерфейс AIC UMUNI. Перелік будівель

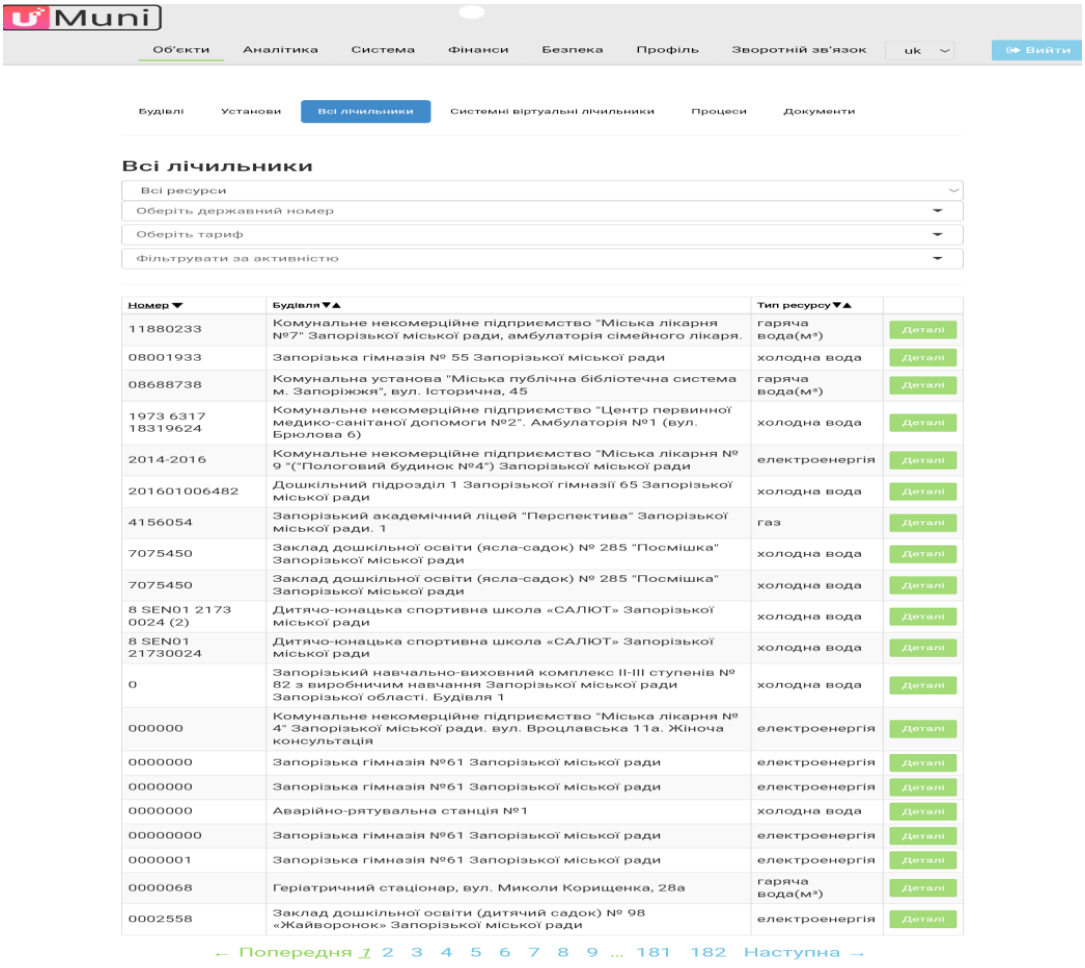


Рис. 3. Інтерфейс AIC UMUNI. Перелік лічильників

AIC UMUNI забезпечує інтегровані процеси збирання, аналізу та зберігання даних. Платформа підтримує функції моніторингу, що дає можливість не лише здійснювати порівняльний аналіз показників за різними періодами, а й враховувати зміни температури, погодні умови або інші фактори, які можуть впливати на споживання енергії. Система є потужним інструментом для прийняття обґрунтованих рішень щодо енергоспоживання та економії енергії. Особливість цієї системи в її здатності до аналізу та виявлення аномалій або перевитрат енергоресурсів. У разі перевищення встановлених нормативів чи зростання споживання енергії на об’єктах, ці дані негайно стають підконтрольними для додаткового аналізу з боку енергоменеджерів. Використовуючи AIC UMUNI, можна здійснювати порівняльний аналіз споживання за різні періоди та за різних умов, що дозволяє ідентифікувати потенційно некоректні показники або аварійні ситуації.

Аналітична функція є важливою складовою системи. Дані з різних лічильників обробляються в AIC UMUNI, що дозволяє енергоменеджерам та фахівцям департаменту економічного розвитку проводити детальний аналіз енергоспоживання. Аналіз цих даних дає змогу визначити об’єкти, які потребують термомодернізації, заміни обладнання чи іншого технічного втручання для оптимізації витрат. Такі об'єкти долучають до списку пріоритетних для ремонту чи модернізації, що сприяє зниженню витрат на енергоресурси та підвищенню енергоефективності на всіх рівнях. Запровадження енергомоніторингу передбачає чітке регулювання процесів збору та обробки даних. Кожен керівник установи зобов'язаний призначити відповідального за облік енергоресурсів та регулярно оновлювати інформацію в системі. Всі відповідальні особи повинні бути навчені роботі з автоматизованою системою, що гарантує належний рівень точності та ефективності в управлінні енергоспоживанням. Важливо, що система AIC UMUNI дозволяє автоматично надавати звіти, а також організовує виведення попереджувальних повідомлень у разі виникнення порушень або неполадок.

Платформа AIC UMUNI є одним з ключових елементів в інфраструктурі енергомоніторингу в Запоріжжі. Вона пропонує низку переваг для міських адміністрацій та відповідальних органів. Основною перевагою є можливість інтеграції всіх типів лічильників в єдину систему. AIC UMUNI дозволяє централізувати всі дані від різних приладів обліку

енергоресурсів незалежно від їх виробника, що підвищує прозорість і зручність управління. Крім того, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс і система зворотного зв'язку дозволяють оперативно реагувати на зміни показників споживання. Система також легко адаптується до будь-якої кількості об'єктів і може бути розширена з урахуванням зростання міських потреб. Вбудовані інструменти для аналізу та прогнозування дозволяють знижувати витрати на енергоресурси та сприяти розвитку стратегії енергоефективності. Запровадження такої системи значно покращує управлінські процеси в муніципальних органах, підвищує ефективність контролю за енергоспоживанням та знижує ризики перевитрат. Вона також сприяє створенню надійної основи для стратегічного розвитку енергетичної політики міста, що позитивно впливає на загальну енергоефективність комунальних послуг у Запоріжжі.

Наступним етапом розвитку системи енергомоніторингу у муніципалітеті має стати впровадження практики визначення цільових показників щорічного скорочення споживання енергії. Для цього доцільно керуватися положеннями Методики визначення цільового показника щорічного скорочення споживання енергії, затвердженої наказом Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України від 02.11.2023 № 1006, зареєстрованої в Міністерстві юстиції України 08.12.2023 за № 2144/41200 [3].

У Методиці викладено чіткий порядок розрахунку цільового показника, який відображає частку скорочення споживання енергоресурсів у порівнянні з базовим рівнем. При цьому враховуються погодні умови, режим експлуатації об'єкта, обсяги та структура споживання, а також уже впроваджені заходи з енергозбереження. Ключовим підходом є визначення орієнтиру — бажаного відсотка скорочення — для кожної категорії споживачів, що дозволяє адаптувати систему під специфіку кожного окремого об'єкта чи групи об'єктів у комунальній власності.

Застосування методичних принципів дає змогу формувати індикативні енергетичні цілі як на рівні окремих установ, так і в межах усього міста. Формалізація цільових показників сприяє запровадженню системного енергоменеджменту, який базується не лише на фіксації споживання, а й на динамічному аналізі його змін у часі. Визначення таких цільових орієнтирів забезпечує прозорість і контрольованість процесів енергоспоживання, дозволяє планувати та прогнозувати економію ресурсів, а також дає змогу обґрунтовувати потреби в інвестиціях, розробляти муніципальні програми з енергоефективності, залучати зовнішнє фінансування, у тому числі міжнародну технічну допомогу.

Інтеграція цільових показників у систему енергомоніторингу міста Запоріжжя відкриє нові можливості для переходу від реактивного управління до проактивного планування. Аналіз відхилень від встановлених показників дозволить оперативно ідентифікувати неефективні зони енергоспоживання, спрямувати ресурси на найбільш проблемні об'єкти, запровадити обґрунтовані заходи технічного й організаційного характеру. У результаті муніципалітет отримає інструмент довгострокового стратегічного управління енергетичними процесами з реальним впливом на скорочення витрат, підвищення комфорту в установах та зменшення впливу на довкілля.

Напрями подальшого вдосконалення системи енергомоніторингу в м. Запоріжжя

Подальший розвиток системи енергомоніторингу в місті Запоріжжя доцільно спрямовувати на посилення якості обліку, розширення функціональності програмного забезпечення та підвищення управлінських можливостей муніципалітету в сфері енергоефективності.

Один із практичних напрямів полягає у поетапному охопленні обліком усіх без винятку об'єктів комунальної власності, зокрема ті, де облік наразі здійснюється вручну або взагалі відсутній. Інтеграція всіх об'єктів дозволить сформувати повну картину енергоспоживання в місті та уникнути прогалин у даних.

Не менш важливим є вдосконалення інструментів аналізу, зокрема можливостей порівняння фактичного споживання з розрахунковими нормативами та історичними значеннями, що дозволить своєчасно виявляти об'єкти з нестабільною динамікою споживання або ознаками нераціонального використання ресурсів.

Актуальним завданням є також підвищення кваліфікації відповідальних працівників, які щоденно взаємодіють із системою. Мова йде як про базове навчання для нових користувачів, так і про регулярне оновлення знань для фахівців, які відповідають за аналіз показників та підготовку управлінських рішень.

Забезпечення формування регулярної звітності не лише в межах внутрішньої управлінської структури, а й у вигляді узагальненої відкритої інформації для громади також є важливим кроком. Публічне інформування про результати моніторингу сприятиме підвищенню прозорості в управлінні ресурсами та формуванню довіри до муніципальних ініціатив.

Перспективно, ефективне функціонування системи енергомоніторингу повинно стати основою для розробки цільових програм з підвищення енергоефективності, термомодернізації об'єктів та залучення фінансування з державних і міжнародних джерел. Такий підхід дозволить місту не лише оптимізувати витрати на комунальні послуги, а й зробити крок до сталого енергетичного розвитку.

Висновки. Для забезпечення нормованої точності та достовірності обліку енергоресурсів і виключення суб'єктивних факторів необхідно прагнути до впровадження наскрізних процесів автоматичного формування, збирання, зберігання, оброблення, верифікування та валідування даних. Уніфікація та модернізація приладів обліку з подальшою інтеграцією в єдину цифрову платформу забезпечують стабільність, зменшення впливу людського фактору та своєчасне оновлення інформації.

Розвиток системи енергомоніторингу в місті Запоріжжі доцільно спрямовувати на інтеграцію з іншими цифровими ініціативами міста та залучення інвестицій у новітні технології. Покращення механізмів збору, обробки та аналізу даних у поєднанні з постійним навчанням відповідальних осіб сприятиме більш ефективному управлінню енергоспоживанням.

Запровадження щорічних цільових показників скорочення енергоспоживання відповідно до національних методичних рекомендацій дозволяє формувати системний підхід до оцінки ефективності впроваджених заходів, виявлення пріоритетних об'єктів для модернізації та обґрунтування потреб у фінансуванні.

Забезпечення відкритого доступу до узагальненої інформації через публічні онлайн-ресурси зміцнює прозорість управління ресурсами та сприяє залученню громадськості до ініціатив з енергоефективності. Система енергомоніторингу може стати основою для формування довгострокової енергетичної стратегії міста, орієнтованої на цифрову трансформацію, сталий розвиток та раціональне використання ресурсів.

ПОСИЛАННЯ

1. Рішення міської ради від 12.01.2023 № 12р «Про запровадження системи моніторингу споживання енергоресурсів на об'єктах комунальної власності у місті Запоріжжя», URL: https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50418 (дата звернення 12.05.2025).
2. Програмний продукт енергомоніторингу UMUNI URL :https://www.umuni.com/ (дата звернення 13.05.2025).
3. Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури України. Наказ від 02.11.2023 р. № 1006 «Про затвердження Методики визначення цільового показника щорічного скорочення споживання енергії». Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 08.12.2023 за № 2144/41200, URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2144-23#Text (дата звернення 20.05.2025).

REFERENCES

1. Decision of the City Council dated January 12, 2023 No. 12p "On the introduction of a system for monitoring energy consumption at municipal property facilities in the city of Zaporizhia", URL: https://zp.gov.ua/uk/documents/item/50418 (access date 12/05/2025).
2. UMUNI energy monitoring software product URL: URL:https://www.umuni.com/ (access date 13/05/2025).
3. Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine. Order of 02.11.2023 No. 1006 "On Approval of the Methodology for Determining the Target Indicator of Annual Energy Consumption Reduction". Registered with the Ministry of Justice of Ukraine on 08.12.2023 under No. 2144/41200, URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z2144-23#Text (access date 20/05/2025).

УДК 621.31

УПРАВЛІННЯ ГІБРИДНИМИ СИСТЕМАМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ОСНОВІ ЗАЛУЧЕННЯ АКТИВНИХ СПОЖИВАЧІВ

А. М. Пустовий, Ю. А. Веремійчук

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна тел.: +38(044) 204-82-37, e-mail: y.veremiichuk@kpi.ua ,

У роботі проведено аналіз факторів, що впливають на апаратне управління гібридними системами на боці актисних споживачів, зокрема генерації електричної енергії. Формалізовано можливості апаратного управління у вигляді функцій з врахуванням мінімізації витрат при купівлі електричної енергії. Сформовані алгоритми апаратного управління, що зможуть динамічно адаптуватися під гібридну систему електропостачання з врахуванням технічних та економічних критеріїв.

Ключові слова: *Гібридна система елекропастачання, активний споживач, режими електроспоживання, самоспоживачі, системи акумулювання.*

MANAGEMENT OF HYBRID POWER SUPPLY SYSTEMS BASED ON THE INVOLVEMENT OF ACTIVE CONSUMERS

A. Pustovyi, Y. Veremiichuk

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, ave. Beresteyskyi, 37, Kyiv, Ukraine, tel:+38(044) 204-82-37, e-mail: y.veremiichuk@kpi.ua

The paper analyzes the factors influencing the hardware control of hybrid systems on the side of active consumers, in particular, electricity generation. The possibilities of hardware control in the form of functions are formalized, taking into account the minimization of costs when purchasing electricity. Hardware control algorithms that can dynamically adapt to a hybrid power supply system, taking into account technical and economic criteria, have been formed.

Key words: *Hybrid power supply system, active consumer, power consumption modes, self-consumers, storage systems..*

ORCID: 0009-0007-9283-3753; 0000-0003-0258-0478.

З осені 2022 року, в умовах енергетичного терору України Російською Федерацією, індивідуальні гібридні системи забезпечення побутового споживача електричною енергією отримують величезний приріст у кількості установок. За невеликий проміжок часу, розуміючи важливість наявності резервного живлення для виробництва товарів та послуг, до встановлення таких систем приходять малі непобутові та промислові споживачі. Основою таких систем стало суміщення в собі функції забезпечення навантаження з двох та більше джерел потужності, а також встановлення систем накопичення, для створення запасу електричної енергії від декількох годин функціонування об’єкта. На перших єтапах, головною задачею поставало саме створення резерву живлення. Тому більшість гібридних систем розвивались з двох основних компонентів: інвертор та систем накопичення, які дозволяли зарядити акумулятори від централізованої мережі електропостачання та створити резерв на один найближчий період, коли зовнішня мережа буде недоступна. Далі, по мірі попиту та можливостей споживачі доповнювали дані системи фотовольтаїчними елементами, вітрогенераторами та генераторами на базі двигунів внутрішнього згорання. Варто зазначити, що сучасні системи [1] мають блокову структуру та можуть доповнюватись та маштабуватись без суттєвих додаткових витрат. Саме це дозволило гібридним системам інтергуватися у системи електропостачання різних групи споживачів електричної енергії в тій чи іншій мірі. Наразі новостворенні субєкти з власною генерацією мають можливість взаємодіяти з ринком.

Можливість споживача використовувати різні джерела потужності проявляє інтерес до економічної раціоналізації використання електричної енергії з того чи іншого джерела. При цьому з можливістю «підмішування» електроенергії за різною ціною в періоди доби з мережі взаємодіючи з сегментами на ринку. Так споживач отримує можливість використовувати одночасно одне або декілька джерела генерації відповідно до його сформованого попиту на електроенергію.

Також запровадження нових моделей функціонування генерації на боці активного споживача [2] та поступове ослаблення впливу верхніх та нижніх меж ціни (price-cap) [3] на ринку електричної енергії, сприяло до росту цін.

При цьому споживач має інструменти для створення та розробки стратегій управління гібридною системою та формування підходів до найбільш ефективного використання власної генерації з акумулюванням енергії.

На підхід до вибору стратегії управління гібридною системою будуть впливати такі фактори як:
- графік електричних навантажень ,
- потенційний графік генерації від джерел потужності стохастичного характеру (на базі енергії сонця та вітру),
- графік обмежень навантаження від оператора системи розподілу,
- технічні параметри установки зберігання енергії,
- вартість електричної енергії від кожного доступного джерела,
- технічні параметри перетворювача (інвертора),
- технічні параметри контроллера,
- наявність маневрового навантаження,
- обмеження встановлені моделями взаємодії споживача з сегментами ринком електричної енергії [4].

Тому з врахуванням різних факторів впливу, цільова функція буде мати наступний вигляд:

$$\min \sum_{i=1}^{N} \sum_{t=1}^{T} P_{i,t} C_{i,t} \quad (1)$$

Де, $P_{i,t}$ – потужність і-го джерела в певний момент часу t;
$c_{i,t}$ – вартість електричної енергії і-го джерела потужності в певний момент часу t;
N – кількість джерел потужності;
T – кількість інтервалів часу.

Також при розробці стратегії апаратного управління необхідно дотримуватись балансу потужностей, тобто враховувати, що в кожен момент часу алгебраїчна сума потоків потужності повина бути рівна нулю.

Отже маючи інформацію про елементи системи, їх параметри, прогнозовані значення вартості електричної енергії та модель взаємодії споживача з ринком електричної енергії споживач може сформувати стратегію управління гібридною системою електропостачання з використанням програмно- апаратних комплексів. Що дозволить підвищити економічний ефект від функціонування таких систем на боці активного споживача, а також може призвести до зсуву або навіть зменшенню обягів попиту на електричну енергію, що відобразиться на характері поведінки ціни на РДН та ВДР. Однак наявні технічні рішення щодо такого апаратного управління мають в своєму арсеналі лише статичні налаштування на декілька часових проміжків протягом доби, іноді є можливість налаштувати сценарії для періодів з суттєвими відмінностями в попиті на електричну енергію (набриклад будні та вихідні дні). Разом з цим, зовнішні контроллери або вбудоване програмне забезпечення інвертора має наперед прописані сценарії пріоритетності використання того чи іншого джерела потужності, та реагують лише на технічні тригери, жодним чином не аналізуючи ринкові сигнали.

У результаті проведено аналізу встановлено, що існуючі вбудовані системи апаратного управління не мають можливості динамічної зміни стратегії направлення потоків потужності. В свою чергу це вказує на високий потенціал в проведенні дослідження щодо розробки алгоритмів, які будуть враховувати не лише параметри системи, а й взаємодію активних споживачів з сегментами ринку електроенергії. Реалізовані процедури зможуть динамічно вносити зміни в стратегію апаратного управління для досягнення більшого економічного ефекту від роботи гібридної системи електропостачання для кожного споживача.

ПОСИЛАННЯ

1. Савченко Н., Довгалюк О. Принципи формування оптимальної структури електроенергетичної системи з комплексним використанням джерел розосередженої генерації. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА. 2023. №9-10 (187-188). с.36-53. URL:https://doi.org/10.20998/2313-8890.2023.09.02 (дата звернення: 27.04.2025).
2. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та "зеленої" трансформації енергетичної системи України : Закон України від 30.06.2023 № 3220-IX : станом на 30 черв. 2024 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text (дата звернення: 27.04.2025).
3. Про граничні ціни на ринку «на добу наперед», внутрішньодобовому ринку та балансуючому ринку : Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 25.11.2024 № 1976. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1976874-24#Text (дата звернення: 03.01.2025) (дата звернення: 27.04.2025).
4. Пустовий А., Веремійчук Ю. Аналіз механізмів стимулювання розвитку малої розподіленої генерації на боці побутового споживача в ринкових умовах. Енергетика і автоматика. 2025. № 1. С. 78—89. (дата звернення: 27.04.2025).

УДК 621.31

ВИКОРИСТАННЯ ПОРТАТИВНОЇ ТРЕКЕРНОЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ В УМОВАХ МІСТА

Я. Д. Онищенко[1,2], Ю. А. Веремійчук[1,2], С. М. Гончарук[2]

[1]Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна тел.: +38(044) 204-82-37, e-mail: y.veremiichuk@kpi.ua
[2]Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна, тел.: (044) 424-96-44

Авторами проведено екпериментальне дослідження ефективності роботи трекерної системи з портативними сонячними панелями у порівнянні з стаціонарними фотомодулями. У результаті дослідження сформовано базу показників щодо функціонування трекерної установки та підтверджено ефективність використання таких рішень в умовах обмеження площ для встановленння сонячних систем в умовах міста.

Ключові слова: *фотовольтаїка, трекерні системи, фотоелектричні панелі.*

USE OF A PORTABLE TRACKER SOLAR POWER PLANT IN URBAN ENVIRONMENTS

Y. Onyshchenko[1,2], Y. Veremiichuk[1,2], M. Goncharuk [2]

[1,]National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", ave. Beresteyskyi, 37, Kyiv, Ukraine, tel:+38(044) 204-82-37, e-mail: y.veremiichuk@kpi.ua
[2]Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine, 2a Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057 phone: (044) 424-96-44

The authors have conducted an experimental study of the efficiency of a tracker system with portable solar panels in comparison with stationary PV modules. As a result of the study, a database of indicators for the functioning of the tracker system was formed and the effectiveness of using such solutions in conditions of limited space for the installation of solar systems was confirmed in city.

Key words: *photovoltaics, tracking systems, photovoltaic panels.*

ORCID: : [1]0009-0007-9283-3753,[2]0000-0003-0258-0478; [3]0000-0002-5609-7337.

В Україні малопотужні СЕС, переважно встановлені приватними домогосподарствами, залишаються однією з найпоширеніших форм використання відновлюваної енергетики. Їх популярність зумовлена низкою факторів, серед яких економічна вигода, енергетична незалежність та екологічна свідомість населення.

Жителі великих міст, в порівнянні з сільською місцевістю, значно обмежені в можливості встановлення сонячних електричних систем. У міських умовах найбільший розвиток отримала дахова фотовольтаїка. Власники квартир або ОСББ можуть розміщувати сонячні панелі на даху, балконі або на зовнішній стіні будинку. Отримана в результаті «сонячна» електроенергія може використовуватися для покриття енергоспоживання тим самим скорочуючи споживання електрики із загальної мережі.

Одним із недоліком реалізації стаціонарних сонячних електростанцій є наявність вільних площ для розміщення каркасних конструкції. Крім того генерація від стаціонарних СЕС протягом дня має параболічний характер, як наслідок, використовується не весь потенціал сонячної радіації за світловий день. Тому виникає потреба у дослідженні більш ефективних систем та їх інтеграції в електричну мережу будівлі.

Авторами проведено дослідження портативної, малопотужної, побутової сонячної електростанції "My Solar Plant" від іспанських партнерів компанії XIZAN Рисунок 1. [1]. Дана установка оснащена трекерною системою, яка дозволяє використовувати її в умовах міста з максимально ефективністю. В якості порівняння ефективності генерації використовувались дані з панелі JA Solar JAM72D20-435/MB, яка розміщена стаціонарно на даху під кутом 33 градусів. На рисунках 2,3 наведено порівняльний аналіз роботи двох систем за період вимірювання. В якості порівнюваних величин взяті параметри відхилення фактичної генерації сонячної панелі від номінальної потужності(100%) у відсотках за досліджуваний проміжок часу.

Виходячи з порівняння графіків роботи двох сонячних систем, стаціонарної(рис. 2) та трекерної двохосьової(рис.3), встановлено що:

1. Обидва графіки мають деяке відхилення фактичної генерації від номінальної.
2. Графік який описує роботу стаціонарної панелі має параболічну форму з чітко вираженою низькою генерацією на початку та в кінці дослідження, яка становила менше 80% від номіналу.

3. Графік який описує роботу трекерної системи має більш лінійну форму, а значення недоотриманої енергії становило не менше 5% (різкі провали в обох графіках викликані затіненям сонячних панелей спричиненим погодними умовами).

У результаті дослідження встановлено,що середнє значення відхилення фактичної потужності панелі від номінальної, за досліджуваний проміжок часу, становив 17,3% . А це означає, що використання трекерної системи в сонячних електростанція підвищує ефективність роботи на 7,2% . Доцільність застосування таких систем залежить від виду трекера та мети його використання. Трекери підходять для сонячних електростанцій будь-якого типу: мережевих, гібридних та автономних. Гібридні та автономні системи, окрім фотоелектричних панелей та інверторів, включають акумуляторні батареї для накопичення енергії.

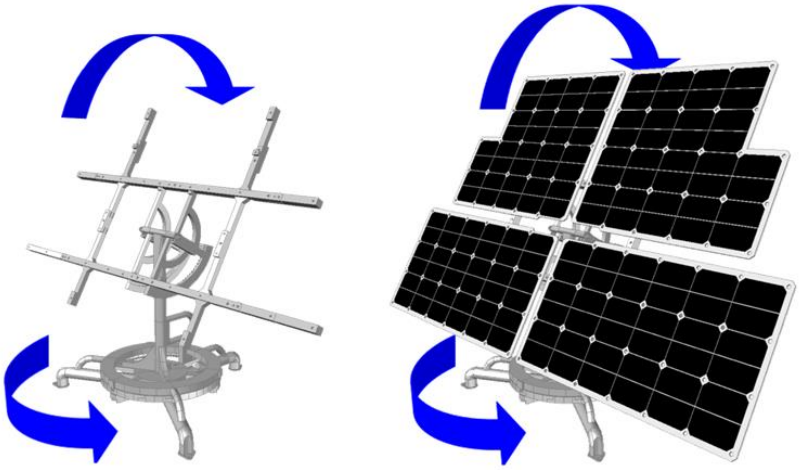


Рисунок 1. а - модель двовісно керної системи, б - розміщення л сонячних модулів на рамі трекера.

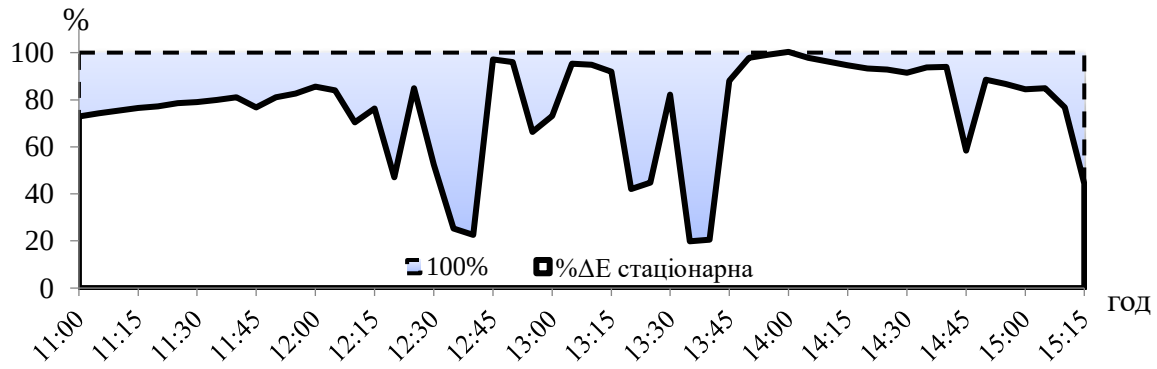


Рисунок 2. Графік недоотримання сонячної енергії панелями стаціонарного розміщення

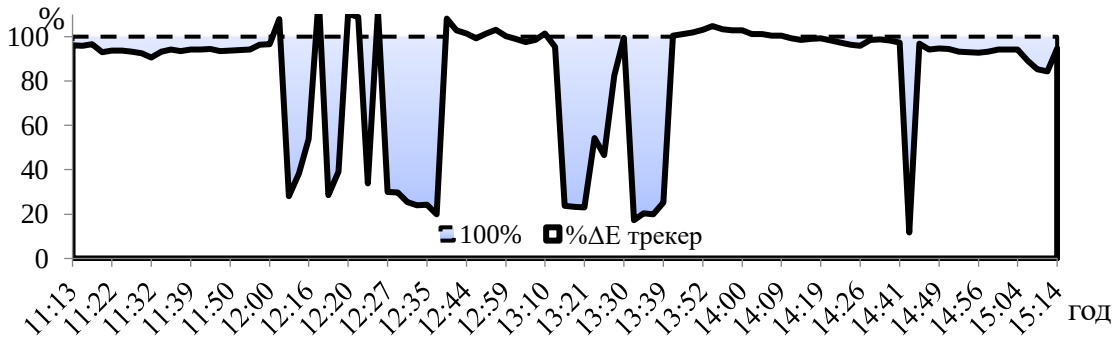


Рисунок 3. Графік недоотримання сонячної енергії панелями з трекерною системою

ПОСИЛАННЯ

1. MY SOLAR PLANT. URL:https://www.xizanenergy.com/my-solar-plant-1 (дата звернення: 13.04.2025)

ГЕОЛОГІЧНІ РИЗИКИ ПРИ РЕАЛІЗАЦІЇ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ПРОЄКТІВ В УКРАЇНІ

А. М. Намонюк

ННІ «інститут геології» Київського Національного Університету імені Тараса Шевченка
Вул. Васильківська 90, 03022, м.Київ, Україна
тел: (095) 304-05-09,e-mail: anton_namoniuk@knu.ua

Геотермальна енергетика розглядається як реальне джерело сталого енергозабезпечення для України, особливо в регіонах із сприятливими геотермічними умовами. Її впровадження дозволяє зменшити залежність від викопного палива та підвищити локальну енергонезалежність. Однак не варто забувати про ризики, що можуть істотно вплинути на успішність таких проєктів. Навіть за наявності сприятливих умов, геологічна невизначеність здатна стати вирішальним чинником — ускладнити буріння, знизити ефективність систем або взагалі зірвати реалізацію проєкту. Щоб уникнути цього, необхідне комплексне розуміння підземного середовища та грамотне управління ризиками ще на етапі проєктування.

***Ключові слова**: геотермальна енергетика, енергетична безпека, геологічні ризики, циркуляція, буріння, стійкість систем.*

GEOLOGICAL RISKS IN GEOTHERMAL PROJECTS IN UKRAINE

A. M. Namoniuk

Institute of Geology, Taras Shevchenko National University of Kyiv
90 Vasylkivska Str., 03022, Kyiv, Ukraine
tel: (095) 304-05-09, e-mail: anton_namoniuk@knu.ua

ORCID: 0009-0003-0539-1653

Geothermal energy is viewed as a realistic source of sustainable energy supply for Ukraine, particularly in regions with favorable thermal conditions. Its implementation can reduce reliance on fossil fuels and enhance local energy independence. However, one should not overlook the risks that may significantly affect project success. Even under favorable conditions, geological uncertainty can become a decisive factor—complicating drilling, lowering system efficiency, or halting implementation altogether. Avoiding such outcomes requires a thorough understanding of subsurface conditions and competent risk management already at the design stage.

***Keywords**: geothermal energy, energy security, geological risks, fluid circulation, drilling, system resilience.*

Україна має значний потенціалів для розвитку геотермальної енергетики. За оцінками, щорічно технічно можливо отримувати до 8,4 мільйона тонн нафтового еквівалента з підземного тепла, що еквівалентно заміщенню приблизно 10 мільярдів кубометрів природного газу [1]. Основні зони, придатні для практичного освоєння, зосереджені в межах Закарпатської улоговини, південного Криму й центральної частини Дніпровсько-Донецької западини. Тут фіксується найвищий тепловий потік (понад 80 мВт/м²), а температури на глибинах можуть перевищувати 110–130 °C, що достатньо як для теплопостачання, так і для генерації електроенергії з використанням низькотемпературних турбін [2]. Попри наявність великої кількості глибоких свердловин, частина з них виявляється непридатною для геотермального використання. Причини — недостатній термальний градієнт, слабка фільтрація або геологічна неоднорідність. Як показують техніко-економічні оцінки, подібні обмеження можуть звести нанівець потенціал навіть перспективної ділянки, якщо не враховувати їх на ранньому етапі [3].

Перший і найпоширеніший тип ризику — це структурна неоднорідність геотермального резервуара. У розрізах часто фіксуються чергування глинистих прошарків, ущільнених вапняків і слабопроникних пісковиків, що ускладнює циркуляцію теплоносія. У результаті виникають ізольовані ділянки без стабільного гідравлічного зв’язку, через що теплоносій не може ефективно циркулювати між нагнітальними й відбірними інтервалами. Це призводить до зниження теплопродуктивності свердловини, зростання витрат енергії на підтримання тиску та передчасного падіння дебіту. Навіть за наявності достатньої температури в породі, ефективна теплова віддача системи може бути неприйнятно низькою через геологічну «розірваність».

Другий ризик пов’язаний із втратою циркуляції бурового розчину, що часто виникає під час проходження тріщинуватих або поруватих інтервалів. Подібні ускладнення особливо характерні для геотермальних об’єктів, де розробка ведеться у складних гідрогеологічних умовах. За даними міжнародної практики, втрата бурового розчину у таких зонах є однією з найпоширеніших причин технічних проблем і неробочого часу свердловин, у деяких випадках становлячи до 15 % від загальної вартості буріння [4]. Наслідками цього можуть бути погіршення герметичності стовбура, ускладнення цементування та необхідність додаткових технічних втручань для відновлення циркуляції..

Третій блок ризиків — це фізична деградація свердловин, зумовлена температурним навантаженням. У проєктах на глибинах понад 2 км температура теплоносія часто перевищує 120 °C, що є межовим значенням для класичних матеріалів цементації й обсадки. При тривалій експлуатації в таких умовах відбувається поступове зменшення міцності цементного кільця, підвищується пористість, виникають мікротріщини. Особливо вразливі старі свердловини, які не були проєктовані під геотермальні режими — для них характерні тонкі стінки труб, відсутність термостійкого цементу, а іноді й неправильне центрування колони. Це створює ризик втрати герметичності, зниження тиску й міжпластових проривів.

Четвертий ризик — недостатня відповідність глибини буріння реальному тепловому розподілу. Через брак сучасних термоградієнтних карт і актуальних гідрогеофізичних моделей свердловини іноді закінчуються на глибинах, де температура виявляється на 20–30 °C нижчою за прогнозовану. Це характерно для об’єктів, спроєктованих на базі архівних геофізичних матеріалів або без локального термального зондування. Відповідно, весь проєкт втрачає рентабельність ще до запуску.

Окремо варто зазначити про геодинамічну активність, що характерна для частини територій України. Хоча сейсмічність країни загалом помірна, у низці регіонів — передусім у Карпатах і на південному сході — спостерігається повзучість, флексури, локальні тектонічні підняття. Такі процеси впливають на просторову орієнтацію тріщин і можуть змінювати напрям циркуляції теплоносія вже після завершення буріння. Це ускладнює довгострокове прогнозування дебіту й стабільності температурного режиму.

Останній із ключових ризиків — невизначеність у довгостроковій поведінці системи. Для геотермії в Україні потрібно уникати розрахунків, що виконуються за спрощеними моделями, які не враховують ані гетерогенність порід, ані не лінійність теплообміну, ані втрати на перетікання між пластами. У результаті фактична теплова потужність об’єкта може виявитися суттєво нижчою за розрахункову вже в перші роки експлуатації. Без залучення інструментів чисельного моделювання та регулярного моніторингу показників — такі проєкти залишаються вразливими до невизначеностей.

Таким чином, ключові геологічні ризики геотермальної енергетики в Україні пов’язані не лише з температурою чи глибиною, а перш за все з непередбачуваною структурою середовища, недостатнім рівнем геофізичного супроводу та фізичним зношенням бурових конструкцій. Зменшення цих ризиків можливе лише за умови поєднання детального попереднього моделювання, цільового буріння, використання термостійких матеріалів і регулярного технічного моніторингу. Геотермальна енергетика в Україні має потенціал — але лише за умови, що до неї ставитимуться не як до простої альтернативи, а як до високочутливої та геологічно складної системи, яка потребує точності на всіх етапах реалізації.

ПОСИЛАННЯ

1. Демчук, Ю. і Лівенцева , Г. 2023. ПОТЕНЦІАЛ РОЗВИТКУ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ. Гірнича геологія та геоекологія. 1(6) (Чер 2023), 64–79. DOI:https://doi.org/10.59911/mgg.2786-7994.2023.1(6).287850.
2. Frey, M., Bär, K., Stober, I. et al. Assessment of deep geothermal research and development in the Upper Rhine Graben. Geotherm Energy 10, 18 (2022). https://doi.org/10.1186/s40517-022-00226-2
3. Rudakov, D., Inkin, O. An assessment of technical and economic feasibility to install geothermal well systems across Ukraine. Geotherm Energy 7, 17 (2019). https://doi.org/10.1186/s40517-019-0134-7
4. Saleh, A., Hasan, A., & Salman, O. (2020). Geothermal Drilling: A Review of Drilling Challenges with Mud Design and Lost Circulation Problem. Stanford Geothermal Workshop. URL: https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2020/Saleh.pdf
5. Mendez, D. P., Davarpanah, A., & Sutter, T. (2019). A study of thermal stress impact on the mechanical integrity of wellbore cement systems in geothermal environments. Proceedings of the 44th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University. URL: https://pangea.stanford.edu/ERE/db/GeoConf/papers/SGW/2019/Mendez.pdf

Наукове видання

МАТЕРІАЛИ XXVI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У XXI СТОЛІТТІ
21–23 травня 2025 року, Київ

Оригінал-макет підготовлено редакційним відділом ІВЕ НАНУ.

Наукові редактори:
Кудря С. О., Зур'ян О. В., Суржик Т. В., Рєпкін О. О.,
Кузнецов М. П., Васько П. Ф., Морозов Ю. П.,
Головко В. М., Будько В. І., Клюс В. П., Яценко Л. В.

Редакційна група:
Суховерков О. В., Недзельська О. М.,
Іванчук О. І., Єзерницька С. Г., Кушнеренко О. В.

Комп'ютерна верстка та дизайн обкладинки:
Суховерков О. В.

Публікується у вигляді електронного видання.
Підписано до публікації 05.05.2025
Протокол № 12 від 05.05.2025