

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТІ

**МАТЕРІАЛИ ХХVІІ МІЖНАРОДНОЇ
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**

**20–22 травня 2026 року
КИЇВ**



RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE XXI CENTURY

**MATERIALS OF THE XXVII INTERNATIONAL
SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE**

**May 20–22, 2026
KYIV**

МАТЕРІАЛИ XXVII МІЖНАРОДНОЇ
НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ

DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.20-22.05.2026>

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТІ

20–22 травня 2026 року
КИЇВ

MATERIALS OF THE XXVII INTERNATIONAL
SCIENTIFIC AND PRACTICAL
CONFERENCE

DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.20-22.05.2026>

RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE XXI CENTURY

May 20–22, 2026
KYIV



Politechnika
Warszawska



УДК 620.91
В 42

В 42 Рекомендовано до друку Вченою радою Інституту відновлюваної енергетики Національної академії наук України (Протокол №10 від 12.05.2026)

ISBN 978-966-999-130-26
УДК 620.91

Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті:
матеріали XXVII міжнародної науково-практичної конференції
(Київ, 20–22 травня 2026).– К.: Інституту відновлюваної енергетики НАН України, 2026.– 568 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
Вчений секретар

Зур'ян О. В.

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

Репкін 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 відповідальності за достовірність інформації, надану авторами.

ISBN 978-966-999-130-26

© Колектив авторів, 2026
© Інститут відновлюваної енергетики НАНУ,
укладання, оформлення 2026

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
- Андришанського 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**

ЗМІСТ CONTENT	4
ВІТАЛЬНІ СЛОВА УЧАСНИКАМ КОНФЕРЕНЦІЇ	31
СЕКЦІЯ «КОМПЛЕКСНІ ПРОБЛЕМИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ НА ОСНОВІ НВДЕ»	
ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА В УКРАЇНІ: ДИНАМІКА ТА СТІЙКІСТЬ	
<i>Г. С. Трипольська, С. Киризиук, Л. Венгер.....</i>	<i>38</i>
RENEWABLE ENERGY IN UKRAINE; DYMANICS AND RESILIENCE	
<i>G. Trypolska, S. Kyryziuk, L.Venger</i>	<i>38</i>
USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN A DOUBLE FORM IN THE SPHERE OF TOURISM AND PROVIDING ELECTRICITY TO REMOTE AREAS	
<i>Kiryigitov Bakhrudin Abdusattarovich.....</i>	<i>40</i>
АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ ПРОГРАМНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ	
<i>І. В. Іванченко, О. О. Кармазін</i>	<i>41</i>
ANALYSIS OF INTERNATIONAL SOFTWARE TOOLS FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF MODERN POWER SYSTEMS	
<i>I. Ivanchenko, O. Karmazin.....</i>	<i>41</i>
РУДНИЧНІ ГІДРО-ПНЕВМАТИЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЗА МОТИВАМИ ФОНТАНУ ГЕРОНА	
<i>Д. Ю. Череватський.....</i>	<i>44</i>
MINE HYDRO-PNEUMATIC POWER PLANTS BASED ON THE FOUNTAIN OF HERON	
<i>D. Cherevatskyi.....</i>	<i>44</i>
МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У ЗАДАЧАХ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОКОЛІ ОБ’ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ	
<i>С. І. Ковтун, Ю. В. Куц, Б. Б. Млинко, М. Є. Фриз.....</i>	<i>46</i>
METHODS AND SOFTWARE FOR PRIMARY DATA PROCESSING IN THE TASK OF AIR POLLUTION MONITORING IN THE VICINITY OF ENERGY FACILITIES	
<i>S. Kovtun, Y. Kuts, B. Mlynko, M. Fryz.....</i>	<i>46</i>
ДЕЯКІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	
<i>В. М. Зварич, Ю. І. Гужко, Л. Б. Остапчук, Г. А. Кузік.....</i>	<i>47</i>
SOME CONTROL AND DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS	
<i>V.M. Zvaritch, Y.I. Gyzhko, L.B. Ostapchuk, G.A. Kuzik</i>	<i>48</i>
РОЗВИТОК СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ У СВІТІ ТА УКРАЇНІ	
<i>Ю. М. Балтовський.....</i>	<i>50</i>

**ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ТА ЗЕЛЕНИЙ ВОДЕНЬ У СТРУКТУРІ
ПІСЛЯВОЄННОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АРХІТЕКТУРИ УКРАЇНИ**

С. О. Кудря, О. В. Зур'ян..... 52

**RENEWABLE ENERGY SOURCES AND GREEN HYDROGEN IN THE STRUCTURE OF THE POST-WAR ENERGY
ARCHITECTURE OF UKRAINE**

Kudrya S., Zurian O...... 52

**РОЛЬ МІКРО-ТЕС З ДВИГУНАМИ СТРІЛІНГА У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ
ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМ**

Є. С. Нікітін, В. М. Павленко 55

**THE ROLE OF MICRO-TPP WITH STIRLING ENGINES IN ENSURING ENERGY SUSTAINABILITY OF LOCAL
FACILITIES IN THE CONDITIONS OF DECENTRALIZATION OF ENERGY SYSTEMS**

Y. S. Nikitin, V. M. Pavlenko 55

THE GROWTH OF RES CAPACITY IN THE POLISH ENERGY SECTOR

Artur Rusowicz 57

**ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙНИХ ARIMA МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО
СТАНУ ВУЗЛІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Д. Д. Овдій, В. М. Зварич..... 58

**USING LINEAR ARIMA MODELS FOR FORECASTING PARAMETERS OF TECHNICAL CONDITION IN ENERGY
EQUIPMENT COMPONENTS**

D.D. Ovdii, V. M. Zvaritch..... 58

PHYSICAL PROCESSES IN THE END PARTS OF THE STATOR OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

K. A. Kuchynskyi..... 60

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В КІНЦЕВИХ ЧАСТИНАХ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

К. А. Кучинський..... 60

**ФОРМУВАННЯ ЗЕЛЕНИХ КОРИДОРІВ У ЧОРНОМУ МОРІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ ТА
ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ РЕГІОНУ**

О. О. Рєпкін..... 62

**FORMATION OF GREEN CORRIDORS IN THE BLACK SEA AS A TOOL FOR THE REGENERATION OF UKRAINE
AND DECARBONIZATION OF THE REGION**

О. О. Riepkin..... 62

**ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ
МЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ**

О. С. Яндульський, Ю. В. Хлистов 64

**ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМАХ З НАСИЧЕННЯМ
ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ**

В. В. Заколюдажний, А. О. Тимохіна, Б. В. Кобзар..... 66

INCREASING THE RELIABILITY OF GENERATOR DIFFERENTIAL PROTECTION UNDER CURRENT TRANSFORMER SATURATION CONDITIONS	
<i>V. V. Zakolodyazhnyy, A. O. Tymokhina, B. V. Kobzar</i>	66
ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ УМОВ ЖИВЛЕННЯ ВІД ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ	
<i>О. М. Попович, І. В. Головань</i>	69
OPTIMIZATION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR OPERATION UNDER POWER SUPPLY FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES.	
<i>О. Popovych, I. Golovan</i>	69
КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ – СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ	
<i>В. О. Дерій, А. О. Запорожець, Т. П. Нечаєва, Я. В. Гавриленко</i>	70
SHORT-TERM FORECASTING OF ENERGY STORAGE DEMAND IN A SOLAR POWER PLANT– ENERGY STORAGE SYSTEM INTEGRATED ENERGY COMPLEX	
<i>V. O. Derii, A. O. Zaporozhets, T. P. Nechaieva, Y. V. Havrylenko</i>	70
ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ РІШЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ ІЗ ПРОМІЖНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ	
<i>В.А. Баженов</i>	72
USE OF ALGORITHMS FOR SOLVING THE TRANSPORT PROBLEM WITH INTERMEDIATE TRANSPORTATIONS FOR OPTIMIZATION OF THE DEVELOPMENT OF ELECTRICITY NETWORKS OF ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES	
<i>V. A. Bazhenov</i>	72
ANALYSIS OF THE PAYBACK PERIOD OF THE NETWORK ENERGY SAVING SYSTEM IN DIFFERENT SEGMENTS OF THE ELECTRICITY MARKET OF UKRAINE	
<i>John Smith, Ann Johnson</i>	74
ІНСТРУМЕНТИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ГАЛУЗІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	
<i>С. В. Зайченко, А. Р. Трачук, А. Буріма, А. Пачев</i>	75
SYSTEM ANALYSIS TOOLS AND THEIR USE IN RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS	
<i>S. V. Zaichenko, A. R. Trachuk, A. Burima, A. Pachev</i>	75
РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДЙОМНОГО МЕХАНІЗМУ ЛІФТА ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ	
<i>Є. О. Філатов, С. В. Зайченко</i>	77
DIGITAL TWIN OF ELEVATOR HOISTING MECHANISM ELECTRIC DRIVE FOR PREDICTIVE MAINTANANCE AND DEGRADATION EVALUATION	
<i>Y. O. Filatov, S. V. Zaichenko</i>	77

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ РЕЖИМНОЇ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ ПРИ КАСКАДНОМУ РОЗВИТКУ ВІДМОВ

I. B. Zakliuka 79

ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING THE REGIME RELIABILITY OF POWER SYSTEMS IN THE CASE OF CASCADE DEVELOPMENT OF FAILURES

I. V. Zakliuka, ... 79

ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВИХ СЦЕНАРІЇВ ЗАМІЩЕННЯ ПАЛИВА НА ЗРУЙНОВАНИХ ВУГІЛЬНИХ ТЕС УКРАЇНИ

Н. П. Іваненко, О. Є. Маляренко 82

RATIONALE FOR POSSIBLE FUEL SUBSTITUTION SCENARIOS AT DESTROYED COAL-FIRED POWER PLANTS IN UKRAINE

N. P. Ivanenko, O. Ye. Maliarenko 82

ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОВОЛЬТНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, Є. О. Тімов, О. О. Базаров 84

USE OF A LOW-VOLTAGE POWER SOURCE FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

M. A. Kovalenko, I. Ya. Kovalenko, Y. O. Titov, O. O. Bazarov 84

RENEWABLE ENERGY STORAGE FROM SECOND-LIFE BATTERIES FOR POWER SYSTEM FLEXIBILITY

G.P. Kostenko, A.O. Zaporozhets 86

НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ УСТАНОВКАМИ НА ОСНОВІ ВТОРИННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Г.П. Костенко, А.О. Запорожець 86

АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОГО ДОСВІДУ З ПРОВЕДЕННЯ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОКОЛІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ

Куликівський О. В., Пономаренко О. В., ... 89

ANALYSIS OF REGULATORY REQUIREMENTS AND EUROPEAN EXPERIENCE IN MONITORING OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY AROUND ENERGY FACILITIES

Kulykivskyi O. V., Ponomarenko O. V., ... 89

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НАДІЙНІСТЮ ІЗОЛЬОВАНИХ МІКРОМЕРЕЖ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

А. В. Давидков 92

АНАЛІЗ ПИТОМИХ ВАГОГАБАРИТНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА ЗОВНІШНІМ РОТОРОМ

М. А. Коваленко, І. Я. Коваленко, Є. О. Тімов, О. О. Базаров 94

ANALYSIS OF SPECIFIC MASS-VOLUME INDICATORS OF HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS WITH EXTERNAL ROTOR

<i>M.A. Kovalenko, I.Ya. Kovalenko, Y.O. Titov, O.O. Bazarov</i>	94
ЗАСТОСУВАННЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ НОВОГО ВВЕДЕННЯ ПОТУЖНОСТІ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ	
<i>I. М. Буратинський</i>	96
APPLICATION OF THE EUROPEAN METHODOLOGY FOR DETERMINING THE COST OF NEW ENTRY ON THE ELECTRICITY MARKET IN UKRAINE	
<i>I. M. Buratynskyi</i>	96
АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ТА МАНЕВРОВОСТІ ТЕЦ У КОМПЛЕКСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ	
<i>В. В. Горський</i>	98
TECHNICAL SOLUTIONS FOR ENHANCING THE FLEXIBILITY OF CHP PLANTS IN INTEGRATED ENERGY SYSTEMS WITH HIGH SHARES OF RENEWABLE ENERGY	
<i>Vitalii Horskyi</i>	98
СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СВІТОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, ВКЛЮЧНО З ВДЕ, ДО РОКУ	
<i>Б. І. Басок</i>	100
CURRENT STATUS AND TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF GLOBAL ENERGY, INCLUDING RENEWABLE SOURCES, UNTIL	
<i>B. I. Basok</i>	100
ВПЛИВ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА НАПРУГУ МЕРЕЖІ З ВДЕ ПРИ ЗБУРЕННЯХ	
<i>А. А. Марченко, В. С. Карнаух</i>	103
IMPACT OF BATATTERY ENERGY STORAGE SYSTEM MODES ON VOLTAGE DURING EMERGENCY SCENARIOUS	
<i>A. Marchenko, V. Karnaukh</i>	103
ВІРТУАЛЬНА ІНЕРЦІЯ ТА VPP-КООРДИНАЦІЯ В КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	
<i>Хомутов С. В.</i>	106
VIRTUAL INERTIA AND VPP -COORDINATION IN HYBRID POWER SUPPLY SYSTEMS	
<i>S. V. Khomutov</i>	106
КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ SMART GRID	
<i>О. А. Мельник, М. П. Зурнаджі</i>	110
CONCEPTUAL PRINCIPLES OF MODERNIZATION OF THE UKRAINIAN POWER SYSTEM BASED ON SMART GRID TECHNOLOGIES	
<i>O. A. Melnyk, M. P. Zurnadzhi</i>	110

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ТИПУ NARX ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНИХ ПОКАЗНИКІВ НА ПРИКЛАДІ МІСТА ОДЕСИ	
<i>М. Д. Сильнягін, В. Г. Побочій.....</i>	112
APPLICATION OF A NARX-TYPE NEURAL NETWORK FOR FORECASTING WEATHER PARAMETERS USING THE CITY OF ODESSA AS AN EXAMPLE	
<i>M. Sylniahin V. Pobochii.....</i>	112
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ В MICROGRID З ВИКОРИСТАННЯМ SMART GRID ТА ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ	
<i>О. В. Окушко, І. П. Радько, В. А. Наливайко.....</i>	115
INTELLIGENT MONITORING AND FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN MICROGRIDS USING SMART GRID AND IOT TECHNOLOGIES	
<i>O.V. Okushko, I.P. Radko, V.A. Nalyvaiko</i>	115
АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ І НАУКОВІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА	
<i>Р. Ю. Чередниченко, О. В. Окушко</i>	117
ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND SCIENTIFIC PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS OF A LOCAL FACILITY	
<i>R. Yu. Cherednychenko, O. V. Okushko</i>	117
ФОРМУВАННЯ ПРІОРИТЕТІВ ВИВЕДЕННЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ ЗА РЕЗУЛЬТАМИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ	
<i>Є. І. Бардик, О. Л. Бондаренко</i>	119
FORMATION OF PRIORITIES FOR DECOMMISSIONING SF CIRCUIT BREAKERS BASED ON TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT	
<i>Ye. Bardyk, O. Bondarenko.....</i>	119
БАЛАНСУВАННЯ МІКРОЕНЕРГОСИСТЕМ З ДЕФІЦИТОМ ПОТУЖНОСТІ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ ГРАФІКІВ ВІДКЛЮЧЕНЬ	
<i>В. В. Войтенко</i>	122
BALANCING MICROENERGY SYSTEMS UNDER POWER DEFICIT BY APPLYING CYCLIC OUTAGE SCHEDULES	
<i>V. V. Voitenko.....</i>	122
ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В МЕРЕЖАХ З ІНВЕРТОРНИМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ	
<i>С. М. Ремез.....</i>	125
FEATURES OF IMPLEMENTING RELAY PROTECTION IN NETWORKS WITH INVERTER-BASED DISTRIBUTED GENERATION SOURCES	
<i>S. M. Remez.....</i>	125

СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ БАЛАНСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СПІЛЬНОТИ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖРЕЛ ТА ЛОКАЛЬНИХ ТЕС	
<i>В. В. Каплун, Є. О. Кулибаба</i>	127
STRUCTURAL MODEL OF FORMING THE ENERGY BALANCE OF THE COMMUNITY BASED ON RENEWABLE SOURCES AND LOCAL TPPS	
<i>V. V. Kaplun, Y. O. Kulybaba.....</i>	127
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АДАПТИВНОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ	
<i>О. С. Яндульський, О. В. Цивон</i>	129
RESEARCH ON THE OPERATION OF ADAPTIVE RELAY PROTECTION IN DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES	
<i>O. Yandulskyi, O. Tsyvon</i>	129
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ЯК ОСНОВА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ	
<i>О. С. Яндульський, В. С. Гулий.....</i>	132
SMART GRID AS THE BASIS FOR THE MODERNIZATION OF UKRAINE'S ENERGY SECTOR	
<i>O. S. Yandulskyi, V. S. Hulyi</i>	132
ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВУСТІЙКОСТІ СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗУМНИХ МЕРЕЖ ТА МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ CESIUM CLOCK В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ	
<i>В. В. Коваль, О. В. Самков, В. М. Зварич, В. І. Вакась, О. М. Піскун, Б. О. Самков.....</i>	134
INCREASING THE RESILIENCE OF SMART NETWORKS AND MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYNCHRONIZATION SYSTEMS USING CESIUM CLOCK IN MARTIAL ARTS CONDITIONS	
<i>V. V. Koval, O. V. Samkov, V. M. Zvaritch, V. I. Vakas, O. M. Piskun, B. O. Samkov</i>	134
АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ В МІКРОМЕРЕЖАХ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ПОПИТОМ	
<i>О. С. Головка, С. І. Ковтун</i>	136
ANALYSIS OF SHORT-TERM ELECTRICITY CONSUMPTION FORECASTING METHODS IN MICROGRIDS FOR DEMAND-SIDE MANAGEMENT	
<i>O. Holovko, S. Kovtun</i>	136
КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД СТВОРЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЕЧНИХ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ РЕЧОВИН	
<i>О.О. Березовчук, А. В. Коник.....</i>	138
CONCEPTUAL APPROACH TO CREATION AND APPLICATION OF SAFE HEAT-ACCURACYING MATERIALS	
<i>О. О. Berezovchuk, А. V. Konyk.....</i>	138

ГНУЧКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ*О.В. Остапчук, М.П. Болотний, Д.В. Дмитришин,.....* 140**FLEXIBILITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEM IN MODERN CONDITIONS***O. Ostapchuk, M. Bolotnyi, D. Dmytryshyn,.....* 140**ПРОГНОЗУВАННЯ ІМОВІРНОСТІ ВІДМОВИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА УМОВ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ТА ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ***Є. І. Бардик, Я. С. Коваль.....* 142**PREDICTING THE PROBABILITY OF POWER TRANSFORMER FAILURE UNDER INSULATION AGING AND METEOROLOGICAL FACTORS***E. I. Bardik, Y. S. Koval.....* 142**СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОАУДИТУ КОМУНАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ КРИЗИ***О. В. Бориченко, А. В. Чернявський, К. А. Чернявський.....* 144**SYSTEMATIC APPROACH TO ENERGY AUDITS OF MUNICIPAL DISTRICT HEATING ENTERPRISES IN UKRAINE UNDER ENERGY CRISIS CONDITIONS***O. V. Borychenko, A. V. Cherniavskiy, K. A. Cherniavskiy.....* 144**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ІНВЕРТОРІВ У МІКРОМЕРЕЖАХ***В. О. Федотенко, В. В. Чижевський.....* 146**INCREASING THE EFFICIENCY OF PARALLEL OPERATION OF INVERTERS IN MICROGRIDS***V. Fedotenko, V. Chyzhevskiy.....* 146**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСКУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ У ІНФРАЧЕРВОНОМУ ДІАПАЗОНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СПЕКТРУ***О. І. Шматок, С. М. Гончарук.....* 148**EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CAMOUFLAGE PROPERTIES OF MATERIALS IN THE INFRARED RANGE OF THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM***O. I. Shmatok, S. M. Goncharuk.....* 148**ІНТЕГРАЦІЯ ПРИНЦИПІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ ПРОЄКТУ RETRIEVE У ПОВОЄННУ ВІДБУДОВУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ: СТРАТЕГІЯ ІННОВАЦІЙНОГО СТРИБКА ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО СУВЕРЕНІТЕТУ***М. О. Карпаш, Л. Я. Жовтуля, Н.-А. Ю. Сорока, А. В. Яворський.....* 150**INTEGRATION OF THE RETRIEVE PROJECT CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES INTO THE POST-WAR RECONSTRUCTION OF UKRAINE'S ENERGY SYSTEM: A STRATEGY OF INNOVATION LEAPFROGGING AND ENERGY SOVEREIGNTY***М. О. Karpash, L. Y. Zhovtulia, N.-A. Y. Soroka, A. V. Yavorskyi.....* 150**НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВИТКУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УКРАЇНІ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ***М. О. Карпаш, Л. Я. Жовтуля, В. Б. Васечко.....* 152

REGULATORY AND TECHNICAL FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT OF DECENTRALISED ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS IN UKRAINE: CURRENT STATUS AND PROSPECTS	
<i>M. O. Karpash, L. Y. Zhovtulia, V. B. Vasechko.....</i>	152
ОЦІНЮВАННЯ ОСНОВНОЇ ЧАСТОТИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФАЗОВИМ МЕТОДОМ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕНІ ГІЛЬБЕРТА ІЗ КОВЗНИМ УСЕРЕДНЕННЯМ НАБІГУ ФАЗИ НАПРУГИ	
<i>В. П. Малько, С. І. Ковтун, Ю. В. Куц, В. Ю. Куц.....</i>	155
ESTIMATION OF THE FUNDAMENTAL FREQUENCY OF THE POWER SUPPLY VOLTAGE USING A PHASE METHOD BASED ON THE HILBERT TRANSFORM WITH MOVING AVERAGING OF THE ACCUMULATED VOLTAGE PHASE	
<i>V. Malko, Y. Kuts, S. Kovtun, V. Kuts</i>	155
ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ФОТОВОЛЬТАІЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ В АВТОМАТИЗОВАНИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИКИ	
<i>С. Бойченко, Б. Яворський, К. Осадчик, С. Шман, Д. Сябрук</i>	158
PROSPECTS FOR INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS AND HYDROGEN GENERATION SYSTEMS IN AUTOMATED AUTONOMOUS ELECTRICITY GENERATION SYSTEMS	
<i>S. Boichenko, B. Yavorsky, K. Osadchyk, S. Shman, D. Syabruk</i>	158
DECENTRALIZED MANAGEMENT OF LOW-VOLTAGE NETWORKS WITH DISTRIBUTED PV GENERATION	
<i>Mukhlisakhon Begmatova</i>	160
EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR INTERPRETING NEURAL NETWORK MODELS IN ELECTRICITY GRID LOAD FORECASTING	
<i>S. I. Shapovalova, V. M. Titov.....</i>	162
СЕКЦІЯ «ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ»	
АЛЬТЕРНАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ОЦІНКА ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ	
<i>А. О. Янюк, В. В. Федонюк, А. Г. Євтух, М. А. Федонюк</i>	164
ALTERNATIVE WATER SUPPLY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENT OF THEIR ENERGY EFFICIENCY	
<i>A. O. Yanyuk, V. V. Fedonyuk, A. G. Yevtukh, M. A. Fedonyuk.....</i>	164
SYNTHESIS OF SnO_2 METAL OXIDE FILMS AND THEIR SENSITIVITY TO VARIOUS GASES	
<i>Usarov Khamidillo Saydullo ugli.....</i>	167
ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СПЛАВУ САМІТАЛ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ В ЕЛЕКТРИЧНУ	
<i>В. В. Козирський, В. Я. Бунько.....</i>	173
USE OF ELEMENTS MADE OF FUNCTIONAL CAMITAL ALLOY FOR CONVERTING THERMAL ENERGY FROM LOW-POWER SOURCES INTO ELECTRICITY	
<i>V. V. Kozyrskiy, V. Ia. Bunko</i>	173

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ТЕПЛООВОГО СТРЕСУ В ТВАРИННИЦТВІ	
<i>Ю. І. Дзюбан.....</i>	176
SUBSTANTIATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE COOLING SYSTEMS TO MINIMIZE HEAT STRESS IN LIVESTOCK	
<i>Y. Dziuban.....</i>	176
СВИНЦЕВО-ВУГЛЕЦЕВІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ	
<i>В. Ю. Скосар, С. В. Комаров, Н. В. Бурилова, С. В. Бурилов.....</i>	178
LEAD-CARBON BATTERIES	
<i>V. Yu. Skosar, S. V. Komarov, N. V. Burylova, S. V. Burylov.....</i>	178
ЗАЛІЗНИЧНИЙ МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ	
<i>В. Ю. Скосар, Ю. В. Шкіль.....</i>	181
MAGNETOLEVITATION RAIL TRANSPORT	
<i>V. Yu. Skosar, Yu. V. Shkil</i>	181
ЗАХОДИ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК ІЗ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ	
<i>В. М. Пазюк, В. М. Вішнівський, С. О. Бірюков, О. В. Пазюк.....</i>	184
MEASURES TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT PUMP DRYERS	
<i>V. M. Paziuk, V. M. Vyshnievskyi, S. O. Biriukov, O. V. Paziuk.....</i>	184
CHARGE LIMITS FOR HYDROCARBON REFRIGERANTS IN HVACR SYSTEMS IN ACCORDANCE WITH REVISED EN : STANDARD	
<i>Katarzyna Katana, Andrzej Grzebielec.....</i>	187
ЕКОНОМІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МІКРОМЕРЕЖ РЕГІОНУ	
<i>Н. Л. Корженівська, Є. О. Пономаренко</i>	189
ECONOMIC INSTRUMENTS FOR DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT MICROGRIDS IN THE REGION	
<i>N. L. Korzhenivska, E. O. Ponomarenko</i>	189
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКУМУЛЯТОРІВ ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ТА КОРОЗІЙНИХ ВТРАТ: КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА СВИНЦЕВО-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИТНИХ ЕЛЕКТРОДІВ	
<i>М. В. Костуря, С. В. Корпач.....</i>	192
IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF LEAD-ACID BATTERIES BY REDUCING POLARIZATION AND CORROSION LOSSES: A COMPREHENSIVE EVALUATION OF LEAD-CARBON COMPOSITE ELECTRODES	
<i>М. В. Костуря, С. В. Корпач.....</i>	192
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ТЕРМОІНЕРЦІЙНИХ КОНСИСТЕНТНИХ МАТЕРІАЛІВ	
<i>Т. Л. Грабова, О. Є. Степанова, Д. В. Посунько</i>	194

ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES FOR PROCESSING THERMO-INERTIAL CONSISTENT MATERIALS*T. L. Hrabova, O. E. Stepanova, D. V. Posunko* 194**REDUCTION IN THE USAGE OF F-GASES IN THE EUROPEAN UNION OVER THE LAST DECADE***Andrzej Grzebielec, Katarzyna Katana* 196**ЕКСЕРГЕТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ ПИВОВАРНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАРІАЦІЙНИХ НЕРІВНОСТЕЙ***К. О. Волчанська* 198**EXERGY OPTIMIZATION OF COGENERATION SYSTEM CONTROL IN A BREWERY USING VARIATIONAL INEQUALITIES***К. О. Volchanska* 198**КОМПЛЕКСНА ТЕРМОХІМІЧНА ПЕРЕРОБКА ГУМОВИХ ВІДХОДІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН***С. О. Кірко¹, К. Є. П'яних²* 200**COMPLEX THERMOCHEMICAL PROCESSING OF RUBBER WASTE FROM AUTOMOBILE TIRES***S. O. Kirko¹, K. Ye. Pyanykh²* 200**ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОБІГРІВ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ВІКОН, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В СИСТЕМАХ ПОВІТРЯОБМІНУ ПРИМІЩЕНЬ***Б. І. Басок, Д. Б. Давиденко* 202**ELECTRICAL HEATING OF VENTILATED WINDOWS USED IN ROOM AIR EXCHANGE SYSTEMS***B. I. Basok, D. B. Davydenko* 202**АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ОТРИМАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МОТОРНОГО ПАЛИВА З ВІДХОДІВ ПЛАСТИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗНОШЕНИХ ШИН В УКРАЇНІ***С. В. Бойченко, І. О. Шкільнюк, І. О. Куберський,
Б. Ф. Кочірко, І. А. Левандовсткий, К. В. Фута* 203**ANALYSIS OF THE POTENTIAL FOR PRODUCTION OF ALTERNATIVE MOTOR FUEL FROM WASTE PLASTICS AND POLYETHYLENE AND WASTE TYRES IN UKRAINE***S. Boichenko, I. Shkilnyuk, I. Kuberskyi, B. Kochirko, I. Levandovstkyi, K. Futa* 203**СПАЛЮВАННЯ В РЕЖИМІ САМОЗАЙМАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ РІДКИХ ПАЛИВ***В. М. Чмель, І. П. Новікова* 205**SPONTANEOUS COMBUSTION OF ALTERNATIVE LIQUID FUELS***V. N. Chmel, I. P. Novikova* 205**ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАЛИВ ТА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ЯК КРИТЕРІЙ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ ПАЛИВ, ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ДОВКІЛЛЯ ЗА УМОВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ***Б. С. Сорока¹, А. В. Лоба^{2*}, Д. І. Федоров³* 208

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FUELS AND COMBUSTION PRODUCTS AS A CRITERIA FOR SELECTING EFFICIENT FUELS, ENVIRONMENTAL DECARBONIZATION UNDER THE CONDITIONS OF DIGITISATION OF CALCULATIONS	
<i>B. Soroka¹, A. Lyba^{2*}, D. Fedorov³</i>	208
ВИКОРИСТАННЯ СЕС ТА БУФЕРНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ	
<i>A. M. Терешенко</i>	212
USE OF PV SYSTEMS AND BUFFER ENERGY STORAGE TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS	
<i>A. Tereshenko</i>	212
АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КОМУНАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ «ВІННИЦЬКИЙ ГУМАНІТАРНИЙ ЛІЦЕЙ № ІМЕНІ М.І. ПИРОГОВА» ТА МОЖЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ	
<i>О. В. Коваль</i>	214
ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF THE MUNICIPAL INSTITUTION “VINNYTSIA HUMANITARIAN LYCEUM NO. NAMED AFTER M.I. PYROHOV” AND THE POSSIBILITIES OF IMPLEMENTING ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES	
<i>O .V. Koval</i>	214
ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ	
<i>Розен П. В., Розен В. П.</i>	217
THEORETICAL ASPECTS OF ENERGY EFFICIENCY DIAGNOSTICS IN PRODUCTION SYSTEMS	
<i>Rozen P. V., Rozen V. P.</i>	217
СТРУКТУРИЗАЦІЯ ГЕЛІОПАСИВНИХ БУДІВЕЛЬ З ІНТЕГРОВАНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ (BIPV) В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ ЕНЕРГОПОТУЖНОСТЕЙ	
<i>М. В. Одінцов</i>	219
ЗМЕНШЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВІДДАЧІ ВІД НАГРІТОЇ ПОВЕРХНІ В ДОВКІЛЛЯ	
<i>Б. І. Басок, В. Г. Демченко</i>	221
REDUCTION OF RADIATIONAL HEAT TRANSFER FROM A HEATED SURFACE TO THE ENVIRONMENT	
<i>B. I. Basok, V. G. Demchenko</i>	221
ТЕПЛОВОЛОГІСНЕ І БАКТЕРИЦИДНЕ ОБРОБЛЕННЯ ПОВІТРЯ РОЗЧИНАМИ НЕОРГАНІЧНИХ СОЛЕЙ ПРИ СУШІННІ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ	
<i>Ю. Ф. Снежкін, Д. М. Чалаєв, Н. О. Дабіжа</i>	222
HEAT, MOISTURE AND BACTERICIDAL AIR TREATMENT WITH INORGANIC SALTS SOLUTIONS IN HEAT-SENSITIVE MATERIALS DRYING	
<i>Yu. F. Sniezhkin, D. M. Chalaev, N. O. Dabizha</i>	222

ІНВЕРСНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОЇ ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЇ ВАКУУМНИХ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ПАНЕЛЕЙ*A. С. Данішевський* 224**INVERSE ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES FOR NON-DESTRUCTIVE ASSESSMENT OF VACUUM INSULATION PANEL DEGRADATION***A. Danishevskiy*..... 224**СЕКЦІЯ «СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА»****SEARCHING FOR WAYS TO IMPLEMENT QUANTUM-SIZE EFFECTS IN VARIOUS STRUCTURES OF SILICON SOLAR CELLS***R. Aliev*..... 226**SYNERGISTIC FORMATION OF OUTPUT PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE SILICON STRUCTURES UNDER CONDITIONS OF HIGH SOLAR RADIATION***R. Aliev, M. Alinazarova, D. Khonbutaeva*..... 228**КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ МАЛОМАСШТАБНОГО АГРОФОТОВОЛЬТАІЧНОГО МОДУЛЯ***О. В. Зур'ян, С. В. Новицький*..... 229**CONCEPTUAL MODEL OF A SMALL-SCALE AGROPHOTOVOLTAIC MODULE***O. V. Zurian, S. V. Novytskyi* 229**ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСТУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ВІД НЕГАТИВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ***Л. В. Накашидзе*..... 231**SELECTION OF PARAMETERS OF ELEMENTS FOR PROTECTION OF SOLAR BATTERIES FROM NEGATIVE OPERATIONAL INFLUENCES***L. V. Nakashydz* 231**INVESTIGATION OF THE PHOTOELECTRIC PARAMETERS OF A MONOCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL UNDER DIFFERENT COLORED BACKGROUNDS USING THE SINTON SUNS-VOC MEASUREMENT SYSTEM***Xolmatova X. *, Aliyev R., Mirzaalimov N., Rashidov B.,
Mirzaalimov A., Komilov M., Abdulazizov T.* 233**MATHEMATICAL MODELING OF THE DUST CONTAMINATION OF PV PANELS SURFACE***Iliashenko Y.V., Knysh L.I.* 235**THE IMPROVEMENT OF OPTICAL PROPERTIES OF SILICON-BASED SOLAR CELLS USING VARIOUS SURFACE GEOMETRIC STRUCTURES***S. Temirov, Aliev R., Nosirov M.* 236**SIMULATION MODELING OF I-V CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS BASED ON THE SUPERELLIPSE MODEL IN PYTHON ENVIRONMENT***Tadjibayeva Sh., Odiljonov A., Mirzaalimov N., Abdulazizov T.* 237

COMPLIANCE OF LONGI HI-MO X SCIENTIST PHOTOVOLTAIC MODULE WITH INTERNATIONAL (IEC) AND UZBEKISTAN (O'Z DST, SHNQ ..-) MECHANICAL STANDARDS: SIMILARITIES AND DIFFERENCES	
<i>A. Odiljonov¹, B. Rashidov¹, V. Abduazimov¹, A. Kurbonov¹, F. Esonboyev¹, Tadjibayeva Sh., M. Israilova²</i>	240
ENHANCED MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE FIELD DISTRIBUTION IN PHOTOVOLTAIC PANEL	
<i>Karuna Serhii, Knysh Liudmyla</i>	242
ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНОЇ СОЛЯНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОСВІТЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ	
<i>О. О. Рубаненко, М.Р. Аліпатова</i>	243
RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF USING AN OPTICAL SOLAR SYSTEM FOR ILLUMINATING CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES	
<i>O.O. Rubanenko , M.R. Alipatova</i>	243
ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ СОЛЯНОГО СУШІННЯ ТА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ГЕЛІОСУШАРОК	
<i>В. М. Головко, Д.С. Ярута</i>	245
FEATURES OF SOLAR DRYING METHODS AND DESIGN SOLUTIONS OF SOLAR DRYERS	
<i>V. Golovko, D. Yaruta</i>	245
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СНІГОВОГО ПОКРИВУ НА ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ НА ГЕНЕРАЦІЮ СЕС	
<i>А. О. Павлов, О. М. Мороз, О. О. Мірошник</i>	248
RESEARCH ON THE IMPACT OF SNOW COVER ON THE SURFACE OF PHOTOELECTRIC MODULES ON THE GENERATION OF SPP	
<i>А. О. Pavlov, О. М. Moroz, О. О. Miroshnyk</i>	248
PREPARATION AND MORPHOLOGICAL STUDIES OF SOLID SOLUTIONS OF (GE)_x(ZNSE)_x	
<i>Alijon Razzokov, Amin Saidov, Malika Shonazarova, Jaloliddin Razzakov, ...</i>	251
<i>Durdona Koshchanova</i>	251
GROWING A GRADED-BAND SOLID SOLUTION OF SI_xGE_x (<X<) FROM A TIN SOLUTION-MELT	
<i>Alijon Razzokov, Sevara Abdullayeva</i>	253
OPTIMIZING ANTI-REFLECTION LAYERS FOR PEROVSKITE LATERAL HETEROJUNCTION SOLAR CELLS	
<i>Irodakhon Gulomova , Rayimjon Aliyev</i>	255
З'ЄДНАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КЕРОВАНОМУ ДЖЕРЕЛІ ЕНЕРГІЇ	
<i>Д. В. Бондаренко</i>	256
CONNECTION PHOTOVOLTAIC CELLS IN SMART CONTROLLED ENERGY SOURCES	
<i>D. Bondarenko</i>	256

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖЕВИХ СОЛЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ РОБОТІ З ГЕНЕРАТОРОМ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ	
<i>B. C. Степенко</i>	260
IMPROVING THE EFFICIENCY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS OPERATING WITH A GENERATOR IN ISLANDED MODE	
<i>V. Stepenko</i>	260
STUDY OF SERIES AND PARALLEL CONNECTION OF SOLAR CELLS USING THE LEXSOLAR LABORATORY EQUIPMENT KIT	
<i>Mirzaalimov A.A.</i>	262
STUDY OF THE DEPENDENCE OF SOLAR CELL POWER ON ITS SURFACE AREA USING THE LEXSOLAR LABORATORY EQUIPMENT KIT	
<i>Mirzaalimov A.A.</i>	264
ULTRASONIC SURFACE TREATMENT OF SILICON WAFERS FOR PHOTOVOLTAICS	
<i>Aliev R. , Alinazarova M. , Mirzaalimov N.</i>	266
OPERATION OF THE BACKUP PV PLANT UNDER VARIOUS SCHEDULES OF POWER OUTAGES	
<i>O. Gaevskii, V. Budko, O. Doroshenko</i>	268
THE ROLE OF FREQUENCY DISTRIBUTION TYPE OF INSOLATION FLUCTUATIONS IN PHOTOVOLTAIC POWER PLANT CALCULATIONS	
<i>O. Gaevskii, H.M. Gaevska</i>	270
TWO CLUSTERING APPROACHES FOR GENERATING SYNTHETIC INSOLATION SERIES	
<i>O. Gaevskii, H.M. Gaevska</i>	273
АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОГОДНИХ ЯВИЩ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ СОЛЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ УКРАЇНИ	
<i>О. В. Остапчук, О. В Юраш</i>	277
ANALYSIS OF THE IMPACT OF WEATHER PHENOMENA ON THE EFFICIENCY OF SOLAR GENERATION SYSTEMS IN UKRAINE	
<i>O. Ostapchuk, O. Yurash</i>	277
ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ НА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ	
<i>П. Д. Лежнюк, Т. О. Луса</i>	279
IMPACT OF PHOTOVOLTAIC MODULE DEGRADATION ON FORECASTING THE POWER OF PHOTOVOLTAIC PLANTS	
<i>P. D. Lezhniuk, T. O. Lysa</i>	279
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПЛАВНОГО ПУСКУ В СИСТЕМАХ ІЗ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ	
<i>В. М. Головки, Р.Ю. Семененко</i>	281

MATHEMATICAL MODEL OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR FOR SOFT START MODE ANALYSIS IN SYSTEMS WITH PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS	
<i>V. Golovko, R. Semenenko.....</i>	281
ULTRASONIC SURFACE TREATMENT OF SILICON WAFERS FOR PHOTOVOLTAICS	
<i>Aliev R. , Alinazarova M. , Mirzaalimov N., Jalilova V.....</i>	284
MEASURING THE DEPENDENCE OF CURRENT ON VOLTAGE OF AMORPHOUS SILICON USING A THERMAL PHOTOVOLTAIC LABORATORY SETUP	
<i>Zulayxo Muhammadnabiyeva.....</i>	286
ОПТИМІЗАЦІЯ КУТА НАХИЛУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ СХІДНО-ЗАХІДНОЮ ОРІЄНТАЦІЄЮ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ	
<i>A. M. Вергун A. I. Захарченко K. B. Кириленко</i>	287
OPTIMIZATION OF THE TILT ANGLE OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS WITH EAST-WEST ORIENTATION TO ACHIEVE MAXIMUM GENERATION	
<i>A. M. Vergun A. I. Zakharchenko K. V. Kyrylenko.....</i>	287
ДОСВІД РЕАЛІЗАЦІЇ ІННОВАЦІЙНОЇ ПЛАТФОРМИ АГРЕГАТОРА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В РАМКАХ ПРОЕКТУ U-CAN	
<i>A. B. Яворський, М. О. Карпаш, В. Б. Васечко.....</i>	290
EXPERIENCE OF IMPLEMENTING AN INNOVATIVE AGGREGATOR PLATFORM FOR MONITORING PHOTOVOLTAIC STATIONS WITHIN THE U-CAN PROJECT	
<i>A. V. Yavorskyi, M. O. Karpash, V. B. Vasechko</i>	290
ЗАРЯДНА ІНФРАСТРУКТУРА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ	
<i>Лаврич Ю. М., Плаксін С. С., Погоріла Л. М., Подчасов А. Ю.....</i>	292
ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE BASED ON RENEWABLE ENERGY	
<i>Yu. M. Lavrich, S. V. Plaksin, L. M. Pohorila, A. Yu Podchasov.....</i>	292
МАСКУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ПЕРЕГРІВУ ТА ВІДДЗЕРКАЛЕННЯ	
<i>Т. В. Суржик, О. М. Суржик, І. О. Шейко</i>	295
MASKING OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THEIR OVERHEATING AND REFLECTION	
<i>T. Surzhyk, O. Surzhyk, I. Sheiko</i>	297
КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ГЕЛІОПАСИВНИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ МАЛОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ	
<i>Л.А. Курнос, Т.В. Суржик.....</i>	299
CRITERIA FOR EVALUATING THE PARAMETERS OF SOLAR-PASSIVE HEATING SYSTEMS IN LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS	
<i>L. Kyrnos , T. Surzhyk.....</i>	299

TROMBE WALL MODEL

Milan Belik, Ondřej Hoštička, Olena Rubanenko 302

МОДЕЛЬ СТІНИ ТРОМБА

Мілан Белік, Ондржей Гоштічка, Олена Рубаненко 302

ДЕГРАДАЦІЯ КРЕМНІЄВИХ ПЛАСТИН ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Д.І. Брюховських¹, О.В. Остапчук^{1,2} 305

DEGRADATION OF SILICON WAFERS OF PHOTOVOLTAIC MODULES

D. Briukhovskyykh¹, O. Ostapchuk^{1,2} 305

RESOLUTION-DEPENDENT PERFORMANCE OF LLM PROMPT STRATEGIES FOR SOLAR PANEL DETECTION IN AERIAL IMAGERY

S. I. Shapovalova, S. V. Matiakh, M. A. Holovakin 307

СЕКЦІЯ «ВІТРОЕНЕРГЕТИКА»**ХАРАКТЕРИСТИКИ МОМЕНТУ ВТОРИННОЇ ВІПРОТУРБИНИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ**

Г. М Стрункін 309

TORQUE CHARACTERISTICS OF THE SECONDARY WIND TURBINE OF A WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION

H. M. Strunkin 309

ВПЛИВ ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ

К. В. Петренко¹, І. В. Іванченко² 311

IMPACT OF THE CAPACITY FACTOR THRESHOLD ON THE TECHNICAL POTENTIAL ASSESSMENT RESULTS OF WIND POWER PLANTS IN UKRAINE

K. Petrenko, I. Ivanchenko 311

ОЦІНЮВАННЯ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЙ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ ВІТРОВИДНЕВИХ ПІДПРИЄМСТВ

С. О. Кудря, М. А. Ткаленко, Л. В. Яценко 314

ASSESSMENT OF THE SUITABILITY OF TERRITORIES FOR THE LOCATION OF WIND HYDROGEN ENTERPRISES

Kudrya S., Tkalenko M., Yatsenko L. 314

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИБЕРЕЖНИХ ТА ОФШОРНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В АЗОВО-ЧОРНОМОРСЬКОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЗИ ДАНИХ RE DATA EXPLORER

І. Л. Мазуренко 316

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF COASTAL AND OFFSHORE WIND POWER PLANTS IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF UKRAINE USING THE RE DATA EXPLORER DATABASE

<i>I. L. Mazurenko</i>	316
ВІДЦЕНТРОВІ РЕГУЛЯТОРИ РОТОРІВ ДЛЯ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	
<i>М.О. Шихайлов, В.П. Коханевич, ...</i>	318
CENTRIFUGAL ROTOR REGULATORS FOR SMALL-POWER WIND TURBINES	
<i>М.О. Shikhaylov, V.P. Kokhanievich, ...</i>	318
ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ МОДУЛЬНОЇ НЕЙРОННОЇ СИСТЕМИ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ	
<i>О. В. Кулеш, В. М. Зварич.....</i>	321
SOME FEATURES OF THE MODULAR NEURAL SYSTEM FOR VIBRODIAGNOSTICS OF WIND TURBINE GENERATORS	
<i>О. V. Kulesh, V. M. Zvaritch.....</i>	321
СТАБІЛІЗАЦІЯ ВІДЦЕНТРОВОГО РЕГУЛЯТОРА РОТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ПРИ АНТИФЛЮГЕРНОМУ РЕГУЛЮВАННІ	
<i>В. В. Коханевич.....</i>	323
STABILIZATION OF THE CENTRIFUGAL WIND TURBINE ROTOR GOVERNOR DURING ANTI-FLUGER REGULATION	
<i>V. V. Kokhanievich.....</i>	323
МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ В СИСТЕМІ «ВІТРОУСТАНОВКА – ПОСТІЙНІ МАГНІТИ»	
<i>В. М. Головки, В. І. Міхалін</i>	325
MATHEMATICAL MODEL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INDUCTION HEATING PROCESS IN A "WIND TURBINE – PERMANENT MAGNETS" SYSTEM	
<i>Holovko V., Mikhalin V.</i>	325
КОРЕЛЯЦІЯ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ ДЛЯ ВІДДАЛЕНИХ ОДНА ВІД ОДНОЇ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ	
<i>О. Г. Молибог</i>	327
CORRELATION OF POWER DENSITY FOR SPATIALLY SEPARATED WIND POWER PLANTS	
<i>О. Molyboh.....</i>	327
ВИКОРИСТАННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ РОТОРІВ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК	
<i>М. О. Шихайлов, В. П. Коханевич, ...</i>	330
USE OF CENTRIFUGAL FORCES TO ADJUST THE ANGULAR SPEED OF WIND POWER PLANT ROTORS	
<i>М. Shikhaylov, V. Kokhanievich,.....</i>	334

СЕКЦІЯ «ГІДРО-ВОДНЕВА ЕНЕРГЕТИКА»

ПРОГНОЗУВАННЯ СУЧАСНОГО ВИБОРУ ПАЛИВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УМОВАХ ГІБРИДНОЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ*Б. С. Сорока¹, Д. І. Федоров^{2*}, А. В. Луба³.....* 338**FORECASTING THE MODERN CHOICE OF FUELS FOR INDUSTRY AND ENERGY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE UNDER CONDITIONS OF HYBRID DECARBONIZATION***B. Soroka¹, D. Fedorov^{2*}, A. Lyba³.....* 338**ОЦІНКА РЕГІОНАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА СТРАТЕГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ ФОРМУВАННЯ ВОДНЕВИХ ДОЛИН В УКРАЇНІ***М. О. Карпаш, Л. Я. Жовтуля, Н.-А. Ю. Сорока* 344**ASSESSMENT OF REGIONAL POTENTIAL AND STRATEGIC PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN VALLEYS IN UKRAINE***М. О. Karpash, L. Y. Zhovtulia, N.-A. Y. Soroka* 344**PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE HYDROGEN ECONOMY IN GERMANY AND THE APPLICATION OF ENERGY SYSTEM OPTIMIZATION MODELS***Dr. Tashcheiev Y.* 347**АКТУАЛЬНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЄКТУ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ВОДНЕВОЇ СТРАТЕГІЇ УКРАЇНИ***М. П. Кузнєцов* 349**RELEVANCE OF FINDINGS FOR THE IMPLEMENTATION OF UKRAINE'S HYDROGEN STRATEGY***Mykola Kuznietsov* 349**БІЛИЙ ВОДЕНЬ, СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ***М. Бенменні* 351**WHITE HYDROGEN, STATUS AND PROSPECTS***M. Benmenni* 351**КОНЦЕПЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ХАБУ «КОБЛЕВЕ» ЯК МОДЕЛІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ВОДНЕВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПРИЧОРНОМОРСЬКОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ДАНСЬКОГО ДОСВІДУ***Ю. В. Маслов¹, В. П. Киливник², Ю. Л. Борзунов³, О. В. Зур'ян⁴* 354**THE CONCEPT OF THE KOBLEVE ENERGY HUB AS A MODEL FOR DECENTRALIZED POWER GENERATION AND HYDROGEN TRANSFORMATION IN UKRAINE'S BLACK SEA REGION, BASED ON DANISH EXPERIENCE***Y. V. Maslov¹, V. P. Kylyvnyk², Y. L. Borzunov³, O. V. Zurian⁴* 354**ESG У ВОДНЕВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ: ПЕРСПЕКТИВИ ЧИ УТОПІЯ?***М. Р. Лопушанська, Н. В. Ревуцька, Л. В. Циганок, К. В. Яцишина.....* 357

ESG IN HYDROGEN ENERGY: PROSPECTS OR UTOPIA?*M. R. Lopushanska, N. V. Revutska, L. V. Tsyganok, K. V. Yatsyshyna*..... 357**АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ АДАПТАЦІЇ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ ДО ТРАНСПОРТУВАННЯ ВОДНЮ***О. О. Мішин*..... 361**ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF ADAPTING THE UKRAINIAN GAS TRANSPORTATION SYSTEM TO HYDROGEN TRANSPORTATION***О. О. Mishin*..... 361**ВОДНЕВЕ ОКРИХЧЕННЯ СТАЛЕЙ: ВИКЛИКИ ДЛЯ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ***О. Звірко, Д. Демянчук, О. Венгринюк, О. Цирульник, Г. Никифорчин* 363**HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF STEELS: CHALLENGES FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN INFRASTRUCTURE IN UKRAINE***О. Zvirko, D. Demianchuk, O. Vengryniuk, O. Tsyrylnyk, H. Nykyforchyn*..... 363**АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО АМОНІЮ В ЯКОСТІ НОСІЯ ВОДНЮ***М. М. Уланов*..... 365**ANALYSIS OF PRODUCING GREEN AMMONIA AS A HYDROGEN CARRIER***М. N. Ulanov* 365**ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДИНИЧНОЇ КОМІРКИ ВОДНЕВО - КИСНЕВОГО ЕЛЕКТРОЛІЗЕРУ***Ю. К. Пірський, Я. В. Колосовський, А. В. Куций* 367**OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF A SINGLE CELL OF A HYDROGEN-OXYGEN ELECTROLYZER***Yu. K. Pirskyi, Ya. V. Kolosovsky, A. V. Kutsyi*..... 367**ЕЛЕКТРОННА МОДЕЛЬ ВОДНЕВОЇ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ***С. В. Бойченко, Л. К. Лістовщик, В. П. Студенець, І. О. Шкільнюк, В. О. Коровушкін* 369**ELECTRONIC MODEL OF A HYDROGEN FUEL CELL***S. Boichenko, L. Listovshchik, V. Stoudenets, I. Shkilnyuk, V. Korovushkin* 369**АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕЖИМІВ ПІД ЧАС МОДЕЛЮВАННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕМ***С. В. Бойченко, В. О. Коровушкін, І. О. Шкільнюк, Л. К. Лістовщик, В. П. Студенець, Є.М. Бродніковський*..... 371**ANALYSIS OF ENERGY MODES IN THE MODELING OF PEM FUEL CELLS***S. Boichenko, V. Korovushkin I. Shkilnyuk L. Listovshchik, V. Stoudenets, Y. Brodnikovskiy* 371**СТРУКТУРИ ПІДСИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПОЛОЖЕННЯ ЗАПІРНИХ ВЕНТИЛІВ СТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРНИХ УСТАНОВОК ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ***Зайцев Є.О., Кромплас Б.А., Левицький А.С.* 373

STRUCTURES OF SUBSYSTEMS FOR CONTROLLING THE POSITION OF SHUT-OFF VALVES OF STATIONARY ELECTROLYZER PLANTS FOR HYDROGEN PRODUCTION	
<i>Zaitsev Ie.O., Kromplyas B.A., Levytsky, A.S.,</i>	373
ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ	
<i>Д. Ю. Ткаченко</i>	375
APPLICATION OF ELECTROLYSIS TECHNOLOGY FOR HYDROGEN PRODUCTION FROM WIND ENERGY	
<i>D. Tkachenko</i>	375
ВИРОБНИЦТВО «ЗЕЛЕНОГО» ВОДНЮ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ВУГІЛЬНИХ ШАХТ	
<i>О. Г. Молибоз</i>	378
GREEN HYDROGEN PRODUCTION FROM COAL MINE WASTEWATER USING WIND ENERGY	
<i>О. Molyboh</i>	378
ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДИНАМІКИ ГЕНЕРУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ В АЗОВО-ЧОРНОМОРЬСЬКОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПОТУЖНИХ АВТОНОМНИХ КОМПЛЕКСІВ З ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ	
<i>Р. М. Сусак</i>	383
RESEARCH INTO THE POWER OUTPUT DYNAMICS OF WIND POWER PLANT IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF UKRAINE TO ENSURE CONTINUOUS POWER SUPPLY FOR LARGE-SCALE AUTONOMOUS GREEN HYDROGEN PRODUCTION FACILITIES	
<i>R. M. Sysak</i>	383
ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТОВАНОГО ПОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ В ІНТЕГРОВАНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ	
<i>П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко, І. О. Гунько, М. Белік</i>	385
ASSESSMENT OF GUARANTEED ORIGIN OF ELECTRICITY FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION IN AN INTEGRATED ENERGY SYSTEM	
<i>P. D. Lezhniuk, O. O. Rubanenko, I. O. Hunko, M. Belik</i>	385
ПИТОМІ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОПРІСНЕННЯ МОРСЬКОЇ ВОДИ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ	
<i>А. О. Бриль, П. Ф. Васько</i>	388
SPECIFIC ELECTRICITY CONSUMPTION FOR SEAWATER DESALINATION BY REVERSE OSMOSIS METHOD	
<i>А. О. Bryl, P. F. Vasko</i>	388
УМОВИ СТІЙКОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІТРОУСТАНОВКИ ТА НАВАНТАЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ	
<i>П. Ф. Васько, Б. А. Кромпляс</i>	391

CONDITIONS FOR STABLE OPERATION OF WIND TURBINE AND LOAD OF THE WATER DESALINATION TECHNOLOGICAL SCHEME*P. F. Vasko, B. A. Kromplyas* 391**ЗАСТУПНА ЕЛЕКТРИЧНА НЕЛІНІЙНА СХЕМА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ЗІ ЗМІННОЮ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ***П.Ф. Васько, В.А. Рибальченко* 393**ALTERNATIVE ELECTRICAL NONLINEAR CIRCUIT OF A SYNCHRONOUS WIND TURBINE GENERATOR WITH VARIABLE SPEED FOR POWERING THE WATER DESALINATION TECHNOLOGY BY REVERSE OSMOSIS METHOD***P.F. Vasko, V.A. Rybalchenko* 393**ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ МАЛИХ ГЕС ІЗ ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ГІДРОАГРЕГАТУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ***О.М. Попович, І.В. Головань* 395**ENERGY EFFICIENCY OF SMALL HYDROPOWER PLANTS WITH FREQUENCY CONTROL OF THE HYDRO UNIT INDUCTION GENERATOR BASED ON COMPREHENSIVE MODELING RESULTS***О. Popovych, І. Golovan* 395**THERMODYNAMIC MODELING AND STOCHASTIC DEMAND ANALYSIS OF HIGH-PRESSURE HYDROGEN REFUELING FOR FCEVS BASED ON REAL GAS EFFECTS***Linfei Chen, Sergii Boichenko* 396**СЕКЦІЯ «ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА»****МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРЕМІНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФРОНТУ У ВОДОНОСНОМУ ГОРИЗОНТІ***А. А.Барило, А. Сорока, І. В. Лобанова* 401**METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TEMPERATURE FRONT PROPAGATION VELOCITY IN AN AQUIFER***A. Barylo, A. Soroka, I. Lobanova* 401**АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАДДОВГИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ ДЛЯ ВИДОБУТКУ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ***Ю. П. Морозов, В. Г. Олійніченко, Д. М. Чалаєв* 405**ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING SUPER-LONG GRAVITY HEAT PIPES FOR GEOTHERMAL ENERGY EXTRACTION***Yu. P. Morozov, V. G. Olynichenko, D. M. Chalaev* 405**ПЕРСПЕКТИВНІ ГЕОТЕРМАЛЬНІ СИСТЕМИ***В. Ю. Скосар* 407**PROSPECTIVE GEOTHERMAL SYSTEMS***V. Yu. Skosar* 407

АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ ОТРИМАННЯ ТЕПЛОТИ ТА ХОЛОДУ ФАРМАЦЕВТИЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ	
<i>I. В. Перепелиця, О. В. Зур'ян</i>	411
ANALYSIS OF THE EXISTING HEAT AND COLD SUPPLY SYSTEM OF A PHARMACEUTICAL ENTERPRISE: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES	
<i>I. V. Perepelytsia, O. V. Zurian</i>	411
ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ МІСЦЕВОСТІ МІСТА КИЄВА НА ТЕПЛОВИЙ ПОТЕНЦІАЛ ГРУНТОВО-ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛОБІМННИКА	
<i>О. М. Недбайло, О. Ю. Черноусенко, К. Д. Сліжевський, О. В. Власенко</i>	413
THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS OF THE KYIV CITY AREA ON THE THERMAL POTENTIAL OF THE EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER	
<i>O. Nedbailo, O. Chernousenko, K. Slizhevskiy, O. Vlasenko</i>	413
ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДВОСТАДІЙНОГО ВИДОБУВАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ У ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ	
<i>Ю. П. Морозов, О. В. Бачеріков, І. В. Лобанова</i>	416
APPLICATION OF TWO-STAGE GEOTHERMAL RESOURCES EXTRACTION TECHNOLOGY IN HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF UKRAINE	
<i>Morozov Yu.1, Bacherikiv O.2, Lobanova I. 3</i>	416
ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ДВОСТУПЕНЕВИЙ ТЕПЛОВИЙ НАСОС «ПОВІТРЯ-ВОДА» НА R (CO) ДЛЯ ОПАЛЕННЯ БУДІВЛІ	
<i>Е. П. Пастушенко</i>	419
GEOTHERMAL HEAT PUMPS IN SPAIN: PECULIAR DETAILS OF USE AND MARKET	
<i>Hanna Liventseva</i>	422
АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОТЕРМАЛЬНИХ СИСТЕМ ТЕПЛО- І ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ З ПІДЗЕМНИМ АКУМУЛЮВАННЯМ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ	
<i>О. В. Лусак</i>	428
ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS OF GEOTHERMAL HEATING AND COOLING SYSTEMS WITH UNDERGROUND THERMAL ENERGY STORAGE	
<i>O. V. Lysak</i>	428
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДОБУТКУ ВОДИ ЗІ СВЕРДЛОВИНИ МЕТОДОМ «ГАЗЛІФТУ» ІЗ ЗВОРОТНЬОЮ ЗАКАЧКОЮ ВОДИ У СВЕРДЛОВИНУ	
<i>Ю. П. Морозов, О. В. Бачеріков, В. Г. Олійніченко, А. В. Сорока, В. В. Севрюк</i>	431
EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFICIENCY OF WATER PRODUCTION FROM A WELL USING THE “GAS LIFT” METHOD WITH REVERSE WATER INJECTION INTO THE WELL	
<i>Yu. P. Morozov, O. V. Bacherikiv, B.G. Olynichenko, A. Soroka, V. Sevriuk</i>	431

РАЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕПЛООВОГО НАСОСА В ЦИКЛ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ*Н. О. Дабіжа, Т. В. Корінчевська, О. В. Гусарова, Н. С. Малащук*..... 434**RATIONAL SCHEMES FOR INTEGRATION OF HEAT PUMP IN CONVECTIVE DRYING CYCLE***N. O. Dabizha, T. V. Korinchevska, O. V. Husarova; N. S. Malashchuk* 434**СЕКЦІЯ «БІОЕНЕРГЕТИКА»****ПОТЕНЦІАЛ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОВОДНЮ***Г. О. Четверик, М. М. Жовмір*..... 436**POTENTIAL OF AGROBIOMASS FOR PRODUCTION OF BIOHYDROGEN***H. Chetveryk, M. Zhovmir*..... 436**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ПІРОЛІЗНИЙ ПАЛЬНИК – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР***Ю. М. Лобунець, Г. О. Четверик, А. В. Сорока*..... 440**EFFICIENCY OF USING THE SYSTEM: PYROLYSIS BURNER – THERMOELECTRIC GENERATOR***Yu. Lobynetz, H. Chetveryk, A. Soroka*..... 440**АЛЬТЕРНАТИВНЕ ПАЛИВО НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ***Т. В. Корінчевська, В. А. Михайлик*..... 443**ALTERNATIVE FUEL BASED ON PLANT BIOMASS WASTE***T. V. Korinchevska, V. A. Mykhailyk* 443**ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ОСАДІВ СТИЧНИХ ВОД ЗВАЛИЩ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ***Ж. О. Петрова, А. В. Бадеха, Ю. П. Новікова* 445**STUDY OF THE KINETICS OF DRYING SEDIMENTS FROM WASTEWATER LANDFILLS OF SOLID HOUSEHOLD WASTE***Zh. O. Petrova, A. V. Badekha, Yu. P. Novikova* 445**ВИРОБНИЦТВО МЕТАНОЛУ ШЛЯХОМ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВМІСНОЇ СИРОВИНИ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ***К. Є. П'яних, Д. М. Невчас, А. І. Трипольський, П. Є. Стрижак*..... 447**METHANOL PRODUCTION BY GASIFICATION OF CARBON-CONTAINING RAW MATERIALS OF DIFFERENT ORIGIN***K.Ye. Pyanykh, D.M. Nevchas, A.I. Tripolskyi, P.Ye. Stryzhak*..... 447**ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ БІОМАСИ ОБЛІПИХИ КРУШИНОВИДНОЇ, ВИРОЩЕНОЇ НА ТЕХНОГЕННО-ПОРУШЕНИХ ҐРУНТАХ***Л. З. Шевчик-Костюк, О. І. Романюк, І. В. Ощеповський*..... 449

ENERGETIC POTENTIAL OF BIOMASS OF HYPPOPHAE RHAMNOIDES PLANTS, GROWN ON TECHNOLOGICALLY DAMAGED SOILS	
<i>L. Z. Shevchyk-Kostiuk, O. I. Romaniuk, I. V. Oshchapovsky.....</i>	449
ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ЛУЖНОЇ ОБРОБКИ НА ВИДІЛЕННЯ ЛІГНІНУ З БІОМАСИ В КАВІТАЦІЙНОМУ РЕАКТОРІ РОТОРНОГО ТИПУ	
<i>В. В. Сидоренко, Р. Є. Базєєв.....</i>	451
EFFECT OF PARAMETERS OF ALKALINE PRETREATMENT ON EXTRACTION OF LIGNIN FROM BIOMASS IN A ROTATIONAL HYDRODYNAMIC CAVITATION REACTOR	
<i>V. V. Sydorenko, R. Ye. Bazeev</i>	451
ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОДУКТІВ ГАЗИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ З ПРОГНОЗНОЮ ОЦІНКОЮ ВИКИДІВ CO	
<i>Сорока Б. С., Згурський В. О., П'яних К. Є., Кудрявцев В. С.</i>	453
THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF GASIFICATION PRODUCTS OF AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL WASTES WITH A PREDICTIVE ESTIMATION OF CO EMISSIONS	
<i>B. Soroka, V. Zgurskyi, K. Pyanykh, V. Kudryavtsev.....</i>	453
ДОСЛІДЖЕННЯ СПАЛЮВАННЯ ПЕЛЕТ З ВІДХОДІВ ХВОЙНОЇ ДЕРЕВИНИ	
<i>О. М. Дудник, І. С. Соколовська</i>	458
RESEARCH OF COMBUSTION OF PELLETS FROM CONIFEROUS WOOD WASTE	
<i>О. М. Dudnyk, I. S. Sokolovska</i>	458
УСТАНОВКА ПІРОЛІЗУ БІОПАЛИВА ТА ПАРОПОВІТРЯНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ФІКСОВАНОГО ВУГЛЕЦЮ	
<i>Б. Б. Рохман, К. Є. П'яних, Г. О. Четверик</i>	460
BIOFUEL PYROLYSIS AND STEAM AIR GASIFICATION PLANT WITH FIXED CARBON	
<i>B. Rohman, K. Pyanykh, H. Chetveryk</i>	460
ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗВАЛИЩНОГО ГАЗУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ	
<i>М. А. Попков.....</i>	463
PROSPECTS FOR USING LANDFILL GAS TO INCREASE THE FLEXIBILITY OF LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEMS	
<i>М. Popkov.....</i>	463
СЕКЦІЯ «ОСВІТНЯ ДІЯЛЬНІСТЬ»	
ЦИФРОВА ГЕЙМІФІКАЦІЯ В ІНЖЕНЕРНІЙ ОСВІТІ: ВИКОРИСТАННЯ MINECRAFT ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ БУДІВНИЦТВА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ	
<i>В.І. Данилишин</i>	465
DIGITALIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS - CURRENT TRENDS AND A LOOK INTO THE FUTURE	
<i>V. I. Danylyshyn.....</i>	465

METHODOLOGY FOR DEVELOPING STUDENTS SYSTEMATIC ANALYSIS SKILLS IN STUDYING MAXWELL–LORENTZ EQUATIONS*Sevarakhon Bakirova, Azizjon Kurbanov*..... 467**ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «LEARNING BY DESIGN» ДЛЯ РОЗРОБКИ КУРСУ З ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬ З МАЙЖЕ НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ (NZEB)***О. В. Лусак*..... 469**APPLICATION OF THE "LEARNING BY DESIGN" METHOD FOR DEVELOPING A COURSE ON DESIGNING NEARLY ZERO-ENERGY BUILDINGS (NZEB)***О. V. Lysak*..... 469**СЕКЦІЯ «МОЛОДІ ВЧЕНІ»****ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ ПЕРЕРОБКИ СОЇ ТА ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ***О. Р. Багнюк, С. М. Гармаш*..... 471**OBTAINING BIOFUEL FROM SOYBEAN PROCESSING WASTE AND DISTILLERAGE GRAINS AS PROMISING BIOENERGY RESOURCES***О. R. Bagnyuk, S. M. Garmash* 471**МІКРО ВЕС ЯК ЕЛЕМЕНТ “ЗЕЛЕНОГО ПЕРЕХОДУ” ВОЛИНИ: ВІД РЕГІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ДО ЛОКАЛЬНИХ ПРАКТИК***В. А. Гречко, О. О. Сад*..... 473**MICRO WIND POWER PLANTS AS AN ELEMENT OF THE “GREEN TRANSITION” IN VOLYN: FROM REGIONAL STRATEGY TO LOCAL PRACTICES***V. A. Hrechko, O. O. Sad*..... 473**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ НА ДВОХОСЬОВИХ ТРЕКЕРАХ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ПЛОСКОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО ВІДБИВАЧА***П. Є. Кондратюк, П. М. Шеремет, А. С. Ткаченко, О. І. Сіріков*..... 475**INCREASING THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY GENERATION BY SOLAR PANELS ON TWO-AXIS TRACKER BY OPTIMIZING THE PARAMETERS OF THE FLAT MIRROR REFLECTOR***P. E. Kondratyuk, P. M. Sheremet, A. S. Tkachenko, O. I. Sirikov* 475**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЮ З ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ***Мовчанюк А. В., Семінський Є. О.* 477**ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЛЮДСЬКОГО ВОЛОССЯ ЯК ЕКОЛОГІЧНОГО БІОСОРБЕНТУ ДЛЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ***А. О. Олійник* 480**ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ПОТОКІВ ПОВІТРЯ ВІД ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ***А. В. Пеньковий* 481

USING AIR FLOW ENERGY FROM VEHICLES

A. V. Penkovyi.....481

ВІТРИЛА З СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ

А. Д. А. Сарыбога.....482

SAILS WITH SOLAR PANELS

A. D. A. Saryboha.....482

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛА ЛЮДСЬКОГО ТІЛА ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

О. Т. Цариняк, Г. Я. Гургула.....484

POSSIBILITIES OF USING HUMAN BODY HEAT FOR ELECTRICITY GENERATION

O. T. Tsaryniak, H. Ya. Hurhula.....484

**ВПЛИВ КУТА НАХИЛУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ РОБОТИ В УМОВАХ РІЗНОГО
СОНЯЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ**

Д. М. Вагабова.....486

ШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ШАНОВНІ КОЛЕГИ!

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

Енергетична галузь України перебуває у стані глибокої кризи, спричиненої поєднанням воєнних факторів та системних внутрішніх проблем. Постійні російські атаки на об'єкти генерації та розподілу залишаються головним викликом і в той же час поштовхом до знаходження та прийняття нових рішень та інструментів підтримки її подальшого розвитку. Так масовані удари по енергосистемі змусили Україну перейти від централізованої моделі до стратегії розподіленої генерації, яка є значно стійкішою до атак.

Сучасна відновлювана енергетика стала фундаментом енергетичної стійкості України як критичний інструмент виживання енергосистеми в умовах війни, вирішуючи питання децентралізації, енергозабезпечення, балансування системи та адаптації до європейських стандартів.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України вирішує ключові наукові фундаментальні та прикладні проблеми збільшення частки відновлюваних джерел енергії в енергосистемі України, вирішення яких сприяє переходу України до сталого енергозабезпечення. Важливим напрямом є дослідження та впровадження систем акумулювання, зокрема на основі водню, що є незамінним для інтеграції відновлюваних джерел у загальну енергосистему, сприяючи декарбонізації енергетики та енергетичній безпеці.

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 Вас з початком роботи XXVII Міжнародної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті». Всебічна підтримка енергетичного сектору України, його відновлення і реформування є одним із першочергових завдань нашої країни.

За рік, що минув з часу проведення попередньої конференції, актуальність досліджень у царині відновлюваної енергетики та енергоефективності неабияк зросла. Надзвичайно складна зима 2025/2026 стала зайвим підтвердженням того, що енергетична безпека має бути одним з головних пріоритетів держави. Водночас, вона продемонструвала й інше: традиційні інженерно-технічні та організаційні підходи до енергозабезпечення держави можуть мати малу ефективність саме у кризових умовах. Саме тому з новою актуальністю постає питання розвитку інновацій в енергетичному секторі, які базуються на передових наукових дослідженнях і впроваджуються з високим рівнем оперативності. Для поліпшення кризової ситуації в енергетичній галузі здійснюються окремі заходи з децентралізації, у тому числі за рахунок широкомасштабного впровадження технологій відновлюваної енергетики та заходів енергоефективності у всіх сферах господарювання країни. Значна кількість науково-педагогічних працівників «КПІ ім. Ігоря Сікорського», а також студентів та аспірантів беруть активну участь у розробці та впровадженні інноваційних енергетичних проєктів.

Вже понад 20 років основним підрозділом нашого університету, що цілеспрямовано займається підготовкою кваліфікованих фахівців за всіма перспективними напрямками відновлюваної енергетики, є кафедра відновлюваних джерел енергії, яка входить до складу факультету електроенерготехніки та автоматики. Викладачі та студенти кафедри займаються вивченням, розробкою і удосконаленням технологій та обладнання відновлюваної і зеленої водневої енергетики, бурхливий розвиток яких спостерігається зараз у світі і вважається основним елементом декарбонізації економіки та стабілізації енергосистеми. Активна побудова в центральному та західному регіонах України вітроелектростанцій стає ще одним із викликів для підготовки фахівців у цій царині відновлюваної енергетики. З початку 2022 року загальна потужність побудованих в Україні вітроелектростанцій склала за оцінками експертів близько 550 МВт.

Плідно взаємодіючи з іншими закладами вищої освіти, інститутами НАН України та бізнесом, ми переконані, що КПІ ім. Ігоря Сікорського має

перспективу стати провідним науково-методичним центром підготовки фахівців з відновлюваної енергетики. Так, університет активно впроваджує європейські стандарти освіти, постійно удосконалюючи як змістовне наповнення освітніх програм, так і форми їх реалізації..

Шановні колеги! Запрошую до співпраці, що сприятиме підвищенню рівня наукових досліджень, а впровадження їх результатів – досягненню енергетичної безпеки та енергетичної незалежності нашої держави.

Бажаю успішної роботи з обміну результатами наукових досліджень і досвіду практичного впровадження, науковими ідеями та творчими планами.

Ректор
КПІ ім. Ігоря Сікорського,
канд. філос.наук, професор



Анатолій МЕЛЬНИЧЕНКО

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

**ШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ШАНОВНІ КОЛЕГИ!**

Вітаю учасників та організаторів XXVII Міжнародної науково-практичної онлайн-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 у своїй 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, у тому числі на основі водню.

І спільна робота усіх установ Відділення, у першу чергу Інституту відновлюваної енергетики НАН України, та профільних закладів вищої освіти МОН України здатна забезпечити стійкий та гармонійний розвиток відновлюваної енергетики в Україні.

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

Подальший розвиток відновлюваної енергетики України – це питання не лише власної енергетичної та екологічної безпеки, а й спосіб долучитися до глобальних зусиль усього 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 ВЕЕТ НАН України
академік НАН України



Андрій РУСАНОВ

**ШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ШАНОВНІ КОЛЕГИ!**

Вітаю учасників XXVII 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, 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 десятиліття. У секціях енергетики та відновлюваних джерел енергії вирішуються актуальні наукові та прикладні проблеми, спрямовані на використання ВДЕ та енергоефективність. Юні дослідники зазвичай фокусуються на розв'язанні конкретних прикладних проблем, що є актуальними для України та світу. Через повномасштабну війну та пошкодження енергетичної інфраструктури в Україні, в МАН з'явився новий потужний вектор — енергонезалежність та мобільність.

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,
академік НАН України



Станіслав ДОВГИЙ

**XXVII Міжнародна науково-практична конференція
"Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті"
20-22 травня 2026 року**

Вітальне слово

Шановні колеги!

Щиро вітаю учасників, організаторів та гостей XXVII Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», що традиційно об'єднує науковців, інженерів, представників бізнесу та державних інституцій для обговорення ключових викликів і перспектив розвитку сучасної енергетики.

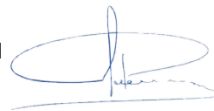
Сьогодні, коли світ прискорює перехід до кліматично нейтральної економіки, розвиток відновлюваної енергетики, енергоефективності та водневих технологій стає одним із фундаментальних факторів енергетичної безпеки, економічної стійкості та сталого розвитку. Для України ці напрями мають особливе значення, адже вони поєднують завдання післявоєнного відновлення, модернізації енергетичної системи та інтеграції до європейського енергетичного простору.

Конференція створює важливу платформу для обміну науковими результатами, практичним досвідом і новими технологічними рішеннями. Саме через такі професійні дискусії формується бачення майбутньої енергетики та закладаються основи інноваційних проєктів.

Особливо важливо, що ця конференція об'єднує наукову спільноту України та міжнародних партнерів, сприяючи розвитку співпраці, трансферу знань і впровадженню передових енергетичних технологій.

Бажаю учасникам конференції плідної роботи, змістовних дискусій, нових наукових ідей та успішної реалізації спільних проєктів у сфері чистої енергетики.

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



Олександр РЕПКІН

**ВЕЛЬМИШАНОВНІ УЧАСНИКИ КОНФЕРЕНЦІЇ!
ДОРОГІ КОЛЕГИ!**

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

Сьогоднішні виклики у сфері енергетичної безпеки, екології та сталого розвитку потребують впровадження інноваційних рішень. Завдяки вашим науковим пошукам та практичним здобуткам створюється надійний фундамент для енергоефективного майбутнього, що стане запорукою добробуту наступних поколінь.

Наші фахівці підтримують конференцію з моменту її заснування, незмінно долучаючись до фахових дискусій. Щорічний формат зустрічей є критично важливим для аналізу трендів відновлюваної енергетики в Україні та світі. Цей майданчик став для нас ефективним інструментом для налагодження колаборацій та зміцнення партнерства як з вітчизняними, так і з міжнародними колегами.

Радий вітати нове покоління енергетиків: представників МАН, студентство та аспірантів. Ваші дослідження – це погляд у майбутнє. Приємно бачити, як ініціатива, яку ІВЕ НАНУ та ФЕА КПІ ім. Ігоря Сікорського заснували у 2017 році, не просто живе, а стає дедалі вагомішою частиною нашої конференції завдяки секції для молодих науковців.

Шановні колеги, Відновлювана енергетика сьогодні формує нову економіку, забезпечуючи роботою тисячі фахівців у суміжних галузях. Упевнений, що наукові здобутки цієї конференції стануть визначальним кроком до енергетичної незалежності та впровадження новітніх технологій в Україні та світі.

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

ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА В УКРАЇНІ: ДИНАМІКА ТА СТІЙКІСТЬ

Г. С. Трипольська¹, С. Киризюк², Л. Венгер³

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

Проаналізовано розвиток відновлюваної енергетики України у 2015–2024 роках під впливом європейської інтеграції та повномасштабної війни. Оцінено еволюцію державної політики підтримки ВДЕ та динаміку потужностей, інвестицій і структури генерації. Запропоновано композитний індекс розвитку ВДЕ на основі чотирьох показників із перевіркою стабільності методом Монте-Карло. Показано, що після 2022 року ВДЕ залишилися єдиним джерелом, виробництво з якого зросло, посиливши стійкість енергосистеми, попри втрати потужностей і зростання вартості капіталу. Результати можуть бути використані для формування політики відновлення та децентралізації енергетики та оцінювання ролі ВДЕ у післявоєнному розвитку та енергетичній безпеці країни.

Ключові слова: відновлювана енергетика, індекс, Україна.

RENEWABLE ENERGY IN UKRAINE; DYMANICS AND RESILIENCE

G. Trypolska¹, S. Kyryziuk², L. Venger³

*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*

The development of renewable energy in Ukraine during 2015–2024 is analysed under the influence of European integration and the full-scale war. The evolution of state support policies and the dynamics of installed capacity, investments, and the generation structure are assessed. A composite renewable energy development index based on four indicators is proposed, and its stability is tested using the Monte Carlo method. The results show that after 2022, renewable energy remained the only energy source whose production increased, thereby strengthening the power system's resilience despite capacity losses and higher capital costs. The findings can support energy recovery and decentralisation policies and assess the role of renewables in post-war development and national energy security.

Keywords: renewables, index, Ukraine.

ORCIDs: ¹0000-0002-8830-7036; ²0000-0002-7955-1272; ³0000-0003-0554-7438.

У 2015–2024 роках розвиток відновлюваної енергетики в Україні відбувався під впливом трьох ключових факторів: європейської інтеграції, структурної трансформації енергетичного сектору та повномасштабної війни. Нами було досліджено основні тенденції державної політики у сфері відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), кількісна оцінка динаміки розвитку сектора та аналіз впливу війни шляхом порівняння довоєнного (2015–2021) і воєнного періодів (2022–2024).

Для оцінювання динаміки розвитку ВДЕ застосовано описову статистику (річні темпи зростання, середні темпи зростання, ковзні середні), аналіз коефіцієнта використання встановленої потужності, а також композитний індекс розвитку ВДЕ. Для узагальненої оцінки розвитку ВДЕ нами запропоновано Композитний індекс розвитку ВДЕ, який інтегрує чотири параметри: встановлені потужності, частку ВДЕ у виробництві електроенергії, обсяги інвестицій та вартість капіталу (WACC). Нормалізацію показників здійснено за методом мін–макс. Для зменшення суб'єктивності при виборі ваг використано метод Монте-Карло з 10 000 ітерацій, що дозволило перевірити стабільність індексу до зміни вагових коефіцієнтів. Отримані результати підтвердили низьку чутливість індексу до структури ваг, що дозволяє використовувати рівні ваги без суттєвих викривлень результатів.

У довоєнний період (2015–2021) розвиток ВДЕ в Україні характеризувався швидким зростанням встановлених потужностей, насамперед сонячної енергетики, що було зумовлено дією механізму «зеленого» тарифу. Водночас цей механізм створив значні фінансові дисбаланси через відставання перегляду тарифів від темпів здешевлення технологій та низький рівень роздрібних цін на електроенергію. До 2021 р. накопичення боргів перед виробниками ВДЕ стало системною проблемою та негативно вплинуло на інвестиційний клімат.

Після 2022 р. структура сектору зазнала суттєвих змін унаслідок руйнування та окупації генеруючих потужностей. Найбільших втрат зазнала вітрова енергетика, значна частина якої була зосереджена на тимчасово окупованих територіях. Водночас біоенергетика та біогаз демонстрували відносну стабільність, а роль сонячної генерації зросла у структурі виробництва електроенергії з ВДЕ. В умовах війни ВДЕ стали єдиним видом енергії, виробництво з якого зросло порівняно з довоєнним періодом.

Загальне споживання викопного палива в Україні скоротилося на 43% [1], що пояснюється як декарбонізаційними тенденціями, так і спадом промислового виробництва та демографічними втратами. Частка електроенергії з ВДЕ у загальному виробництві зросла більш ніж утричі, незважаючи на фізичні втрати потужностей.

Динаміка інвестицій показує, що навіть після початку повномасштабної війни інтерес до проектів у сфері ВДЕ зберігся на відносно високому рівні порівняно з іншими секторами економіки. Це вказує на сприйняття відновлюваної енергетики як інструменту підвищення стійкості енергосистеми та локальної енергетичної безпеки. Водночас воєнні ризики призвели до зростання вартості капіталу, що негативно відобразилося на інтегральних показниках розвитку сектору.

Порівняльний аналіз із ЄС демонструє протилежні тенденції: у ЄС композитний індекс розвитку ВДЕ зростав у 2022–2024 рр. завдяки прискоренню розгортання ВДЕ у відповідь на енергетичну кризу. В Україні ж індекс знизився через військові ризики, втрати потужностей і здорожчання капіталу, попри зростання ролі ВДЕ у структурі енергобалансу.

Еволюція державної політики у сфері ВДЕ відображає перехід від адміністративної моделі підтримки (зелений тариф) до ринкових інструментів (аукціони, премії до ринкової ціни, корпоративні PPA). Водночас запуск аукціонної моделі суттєво затримався, що унеможливило її вплив на розвиток сектору. Після 2022 р. пріоритетами стали децентралізація генерації, розвиток активних споживачів та підтримка малих установок ВДЕ.

Отримані результати дозволяють зробити висновок, що ВДЕ в Україні у воєнних умовах інколи допомагає підвищити опірність енергосистеми. Подальший розвиток сектору має базуватися на ринкових механізмах, розвитку децентралізованої генерації, енергетичних кооперативів та поєднанні ВДЕ з накопичувачами енергії. Важливим є врахування попереднього досвіду із зеленим тарифом для уникнення нових фінансових дисбалансів і погіршення інвестиційного клімату.

Важливим аспектом дослідження є обмеженість і фрагментарність статистичних даних у період воєнного стану, що ускладнює повну кількісну оцінку розвитку ВДЕ та потребує використання наближених показників. Це підкреслює необхідність оприлюднення енергетичної статистики з часовим лагом навіть в умовах війни, що є важливо для планування відновлення енергетичного сектору. Запропонований композитний індекс має прикладне значення як інструмент моніторингу, який може бути адаптований для регіонального рівня або використаний для порівняння сценаріїв повоєнного розвитку.

Окрему увагу доцільно приділити ролі ВДЕ у відбудові територій, що постраждали від бойових дій. ВДЕ можуть стати основою локальних енергетичних систем для громад, лікарень, водоканалів і критичної інфраструктури, поєднуючись із накопичувачами енергії та мікромережами. У цьому контексті розвиток енергетичних кооперативів і моделей колективного інвестування набуває не лише економічного, а й соціального значення. Подальші дослідження доцільно спрямувати на інтеграцію показників накопичення енергії, гнучкості попиту та регіональної диференціації у структуру композитного індексу, що дозволить глибше оцінити реальний внесок ВДЕ у стійкість та декарбонізацію енергосистеми України.

ПОСИЛАННЯ

1. EI. Statistical Review of World Energy 2025. The Energy Institute Statistical Review of World Energy. <https://www.energyinst.org/statistical-review> (дата звернення: 28.01.2026).

USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN A DOUBLE FORM IN THE SPHERE OF TOURISM AND PROVIDING ELECTRICITY TO REMOTE AREAS

Kiryigitov Bakhridin Abdusattarovich

Andijan branch of Kokand University, Andijan, Boburshokh Ave., 3

Phone: (99894) 294-28-02, e - mail: baxriddin.kiryigitov@mail.ru

The work is devoted to the analysis of information on the possibilities of using tourism activities with the practical application of alternative energy sources in remote areas.

Key words: *doublet, infrastructure, renewable energy sources, domestic tourism, wind energy, ecology.*

ORCID: 0009-0007-4838-5922

Today, the problem of electricity supply has become a key challenge, the solution to which allows for the development of the economic potential of remote areas and the improvement of the social situation of the population. The prospects and use of renewable energy sources are considered in the development plans of many countries worldwide and are considered one of the most important of these objectives [1, 3, 5].

Based on the Law of the Republic of Uzbekistan "On Tourism" dated September 18, 2025 No. 3PY-549, many works have been carried out [1] :

- monitoring of the implementation of state, territorial and other programs in the field of tourism was carried out (Article 8, Chapter 2),
- conditions are created for the development of the tourism sector in the relevant territory (Article 10, Chapter 2).

Developing a dual- and triple-generation power generation system has become increasingly important over the past 10 years. The most significant changes in this area have been observed in countries in Africa and Asia. The reason for the growing interest in dual- and triple-generation renewable energy sources is their approximately 3% share of total electricity generation. Although this figure seems small compared to hydropower and wind power, it helps stabilize peak electricity consumption in this region [2,4]. The following approaches to solving this problem form the basis of this strategy:

- Analysis of consumption and level of provision of a given territory with electricity, regardless of its source,
- Creation of new energy resources through the use of renewable energy sources and accumulation of the generated electricity to reduce the pressure on the power grid loads,
- Use of a combined scheme (common electricity supply network and renewable energy sources) with its subsequent supply to the needs of industry, agriculture and the population.

REFERENCES:

1. Law of the Republic of Uzbekistan "On Tourism". July 18, 2019, No. ZRU - 549. URL : lex.uz/docx/4428101 / July 21, 2025, 10:30
2. Klavdienko V.P. Renewable energy in China: trends, innovations, prospects. / Bulletin of the Institute of Economics of the Russian Academy of Sciences. 4, 2023. P. 134-156.
3. Kiryigitov B., Shaxobiddinov F. Green energy in Uzbekistan: use and prospects //JournalNX. Multidisciplinary Peer Reviewed Journal. December. 2025. pp. 32-36
4. Kiryigitov B. Prospects and problems of using alternative energy sources for the development of small-scale tourism // "Economy and Society". - 2025. No. 8 (135).
5. Polonkoeva F.Ya., Ozdoeva Z.Kh. Tourism in the modern world // International research journal. 2022. No. 2 (116). Part 3. February . P.25-27. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2022.116.2.072>

АНАЛІЗ МІЖНАРОДНИХ ПРОГРАМНИХ ІНСТРУМЕНТІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ СУЧАСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

I. В. Іванченко¹, О. О. Кармазін²

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

Проведено порівняльний аналіз ключових міжнародних програмних інструментів для моделювання та оптимізації конфігурації енергосистем.

Ключові слова: ВДЕ, грид-додатки, моделювання, оптимізація, конфігурація, мережі.

ANALYSIS OF INTERNATIONAL SOFTWARE TOOLS FOR MODELING AND OPTIMIZATION OF MODERN POWER SYSTEMS

I. Ivanchenko¹, O. Karmazin²

*Institute of renewable energy, NAS Ukraine,
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv.*

Key international software tools for power system configuration modeling and optimization have been comparatively analyzed.

Key words: RES, grid applications, modeling, optimization, configuration, power grids.

ORCID: ¹0000-0002-5083-4180; ²0000-0002-7628-6880.

Масштабна інтеграція генеруючих потужностей на основі відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в існуючі енергетичні мережі стикається з технічними проблемами та обмеженнями, що вимагають більш специфічних підходів для забезпечення надійності та стабільності їх функціонування. Проектування складних систем, зокрема інтегрування комбінованих систем електропостачання на основі ВДЕ та систем акумулювання енергії, супроводжується необхідністю врахування стохастичного характеру генерації, динамічних змін у навантаженні мережі та техніко-економічних параметрів обладнання, вимагає використання високоточних інструментів моделювання. Сучасне програмне забезпечення (грид-додатки) дозволяє мінімізувати інвестиційні ризики та оптимізувати конфігурацію енергосистем. Нижче, в табл. 1, наведено порівняльний аналіз програмних комплексів, розроблених відомими міжнародними компаніями, для моделювання та оптимізації розподільчих мереж, мікромереж, спеціалізованих компонентів акумуляторної інфраструктури енергосистем.

Табл. 1. Порівняльна характеристика програмних засобів(грид-додатків)

Назва грид-додатку та розробник	Переваги	Недоліки
<i>OpenDSS</i> (EPRI, США) [1]	Відкритий код; висока гнучкість у моделюванні розподільчих мереж та інтеграції ВДЕ; моделює поведінку системи від годин до року з дискретним кроком за часом, розраховуючи усталені режими (потокорозподіл) на кожному кроці; підтримує багатофазне моделювання мереж (небаланс фаз); дозволяє проводити квазістатичне моделювання часових рядів (QSTS), що критично для оцінки впливу ВДЕ на напругу; підтримка скриптів (Python, MATLAB)	Складне навчання; відсутність розвинутого графічного інтерфейсу (керується через код); не має вбудованої бібліотеки стандартизованих моделей обладнання (трансформаторів, кабелів тощо)
<i>GridLab-D</i> (PNNL, США) [2]	Дозволяє створювати комплексні моделі багатокomпонентних мереж; агентне моделювання з деталізованими моделями поведінки нових технологій; може інтегруватися з іншими інструментами для керування даними та	Високі вимоги до обчислювальних ресурсів; складність налаштування для багатокomпонентних систем; непридатність для оптимізації систем накопичення

Назва грид-додатку та розробник	Переваги	Недоліки
	аналізу; ефективний аналіз Smart Grid та попиту (Demand Response) у реальному часі; безкоштовний для використання	
<i>HOMER Pro / Grid / Front</i> (UL Solutions, США) [3, 4, 5]	Світовий стандарт для мікромереж; велика база компонентів; техніко-економічна оптимізація та аналіз ризиків; автоматичний розрахунок тисяч комбінацій обладнання для пошуку конфігурації з найменшою вартістю; має вбудовані бази метеоданих NASA та SolarGIS; розрахунок гібридних систем та аналіз чутливості до змін цін на паливо чи обладнання	Комерційне дороге ПЗ; спрощені фізичні моделі потокорозподілу (фокус на енергетичному балансі)
<i>PVsyst</i> (PVsyst SA, Швейцарія) [6]	Висока точність моделювання фотоелектричних систем; враховує найдрібніші фізичні втрати (омічні втрати в кабелях, температурні коефіцієнти, забруднення панелей); має досконалий інструмент 3D-моделювання затінення та підтримку двосторонніх (bifacial) модулів; звіти визнаються міжнародними банками для видачі кредитів (bankable)	Вузька спеціалізація; платна ліцензія; обмежені можливості моделювання інших типів генерації
<i>SAM</i> (System Advisor Model) (NREL, США) [7]	Безкоштовний інструмент; детальні фінансові моделі; підтримка широкого спектра технологій (сонце, вітер, CSP, геотермальна енергетика, біомаса, сонячне нагрівання води)	Складний інтерфейс; орієнтованість переважно на ринок та енергетичні стандарти США
<i>PerMod</i> (HTW Berlin, Німеччина) [8]	Висока точність моделювання систем «PV + накопичувач»; спеціалізується на оцінці реальної ефективності систем; враховує втрати на перетворення в інверторах при низьких навантаженнях та енергоспоживання системи в режимі очікування, що забезпечує високу точність прогнозу самозабезпечення (self-sufficiency)	Вузька спеціалізація; розроблений переважно для моделювання побутових (житлових) фотоелектричних систем; обмежена підтримка складних топологій розподільчих мереж
<i>DER-VET</i> (EPRI, США) [9]	Комплексне моделювання складних гібридних систем та мікромереж, оцінювання їхньої енергії та загальної ефективності; визначає оптимальний розмір, потужність та склад розподілених ресурсів, щоб максимізувати їхню економічну ефективність шляхом надання пакетних послуг (stacked services) як для споживача (зменшення рахунків за електроенергію, підвищення надійності), так і для енергосистеми (регулювання частоти, надання резервів, відкладення модернізації мережі); безкоштовний з відкритим кодом	Потребує значної кількості специфічних вхідних даних, глибокого розуміння як самих технологій, так і ринкових механізмів; менша увага до фізичних процесів у мережі
<i>EZBattery Model</i> (NREL, США) [10]	Швидке моделювання продуктивності та деградації батарей без необхідності складних електрохімічних моделей; відкритий доступ	Занадто спрощений для досліджень внутрішніх електрохімічних процесів; зосереджений на технічній продуктивності, а не на економічній оцінці
<i>SimSES</i> (TU Munich, Німеччина) [11, 12]	Моделювання розгортання та інтеграції стаціонарних систем зберігання енергії у мережу; технічна та економічна оцінка технологій зберігання енергії; модульна архітектура, компоненти взаємопов'язані та взаємозамінні; детальна симуляція деградації та теплових процесів у накопичувачах; відкритий код (MATLAB/Python)	Потребує навичок програмування; не є повноцінним симулятором енергосистеми, не розраховує потоки потужності в мережі, падіння напруги в лініях або стійкість частоти (для комплексного аналізу мережі його потрібно використовувати з <i>OpenDSS</i>)

Проведене дослідження демонструє, що на сучасному етапі не існує єдиного універсального інструменту, який би повною мірою охоплював усі аспекти моделювання енергосистем. Розширений аналіз зазначених інструментів дозволяє класифікувати їх за рівнем деталізації від макроекономічного аналізу до детального фізичного моделювання процесів у розподільчих мережах. Вибір конкретного програмного забезпечення залежить від мети дослідження. Так, для аналізу фізичної стійкості мереж доцільно використовувати OpenDSS або GridLab-D, тоді як

для обґрунтування інвестиційної привабливості проєктів пріоритетними є HOMER Pro та SAM. Особливої уваги заслуговують програмні комплекси, що дозволяють інтегрувати технічні параметри деградації обладнання (SimSES, PVsyst) у фінансові моделі, що є критично важливим для довгострокового планування енергосистем.

У підсумку необхідно підкреслити, що найбільш перспективним підходом для комплексних наукових досліджень є інтегроване використання декількох інструментів (наприклад, поєднання ГІС-аналізу з моделюванням у SAM або HOMER). Це дозволяє досягти синергії між технічною точністю та економічною доцільністю, що є критично важливим для реалізації стратегії післявоєнної «зеленої» відбудови енергетики України.

ПОСИЛАННЯ

1. OpenDSS. URL: <https://www.epri.com/pages/sa/opendss> (дата звернення: 08.02.2026).
2. GridLAB-D. URL: <https://www.gridlabd.org> (дата звернення: 08.02.2026).
3. HOMER Pro. URL: <https://www.homerenergy.com/products/pro/index.html> (дата звернення: 08.02.2026).
4. HOMER Grid. URL: https://www.homerenergy.com/products/grid/index.html?utm_source=DSIRE&utm_medium=website&utm_campaign=HOMER_Grid&utm_id=98384&utm_source=DSIRE&utm_medium=website&utm_campaign=HOMER_Grid (дата звернення: 08.02.2026).
5. HOMER® Front. URL: <https://www.ul.com/software/ultrus/homer-hybrid-energy-optimization> (дата звернення: 08.02.2026).
6. PVsyst. URL: <https://www.pvsyst.com/en/> (дата звернення: 08.02.2026).
7. System Advisor Model. URL: <https://sam.nrel.gov/about-sam.html> (дата звернення: 08.02.2026).
8. Performance Simulation Model for PV-Battery Systems (PerMod). URL: <https://solar.htw-berlin.de/wp-content/uploads/HTW-PerMod-Dokumentation.pdf> (дата звернення: 08.02.2026).
9. DER-VET. URL: <https://www.der-vet.com/> (дата звернення: 08.02.2026).
10. EZBattery. URL: <https://github.com/pnnl/EZBattery> (дата звернення: 08.02.2026).
11. SimSES. URL: <https://gitlab.lrz.de/open-ees-ses/simses> (дата звернення: 08.02.2026).
12. M. Möller, D. Kucevic, N. Collath, et al. SimSES: A holistic simulation framework for modeling and analyzing stationary energy storage systems, *Journal of Energy Storage*, Volume 49, 2022, 103743, ISSN 2352-152X, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103743>.

РУДНИЧНІ ГІДРО-ПНЕВМАТИЧНІ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ЗА МОТИВАМИ ФОНТАНУ ГЕРОНА

Д. Ю. Череватський

Інститут економіки промисловості НАН України
2, вул. Марії Капніст, Київ, України, 03057
Тел.: (044) 200-55-71, e-mail: cherevatskyi@nas.gov.ua

У роботі запропоновано альтернативну концепцію рудничної гідро-пневматичної електростанції, засновану на принципі фонтану Герона. Запропонована схема інтегрує гідравлічні та пневматичні процеси в єдиний рециркуляційний цикл, у якому шахтне повітря використовується як активний елемент енергетичної системи. Особливу роль у схемі відіграють штатні водовідливи, що забезпечують перекачування води між підземними камерами та циклічну роботу установки. Запропонований підхід формує нову архітектуру підземних енергетичних сховищ і відкриває можливості ефективного використання існуючої шахтної інфраструктури.

Ключові слова: підземне гідроакумулююче обладнання, шахтне повітря, система зневоднення, фонтан Герона, гідропневматична електростанція.

MINE HYDRO-PNEUMATIC POWER PLANTS BASED ON THE FOUNTAIN OF HERON

D. Cherevatskyi

Institute of Industrial Economics of National Academy of Sciences of Ukraine
2, Maria Kapnist, Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (044) 200-55-71, e-mail: cherevatskyi@nas.gov.ua

This paper proposes an alternative concept of a mine hydro-pneumatic power plant based on the principle of Heron's fountain. The proposed scheme integrates hydraulic and pneumatic processes into a single recirculating cycle, where mine air acts as an active element of the energy system. A key feature of the concept is the functional reinterpretation of standard mine dewatering systems, which are used to transfer water between underground chambers and ensure cyclic operation.

The proposed approach establishes a new architectural framework for underground energy storage and enables more efficient utilization of existing mining infrastructure.

Key words: underground pumped storage, mine air, dewatering system, Heron's fountain, hydro-pneumatic power plant.

ORCID: 0000-0003-4038-6393.

The global expansion of solar and wind power generation significantly intensifies the problem of large-scale energy storage. In regions with extensive mining activity, underground pumped storage hydropower plants (UPSH) based on decommissioned mines are considered a promising solution and are already being implemented in several European countries.

However, classical UPSH schemes in mining conditions face a fundamental limitation caused by the coexistence of two interacting flows—mine water and mine air. Their interaction complicates the filling of underground reservoirs, requires complex ventilation systems, and reduces the overall operational reliability of the power plant [1].

This paper proposes an alternative conceptual approach based on reinterpreting the role of mine air using the operating principle of the fountain invented by Heron of Alexandria [2]. Unlike conventional UPSH layouts, the proposed scheme integrates hydraulic and pneumatic processes into a single recirculating cycle, in which mine air becomes an active functional element of the energy system.

A key structural distinction of the proposed concept is the revised role of standard mine dewatering systems. Instead of serving solely for drainage purposes, mine pumps are employed to transfer water between underground chambers, enabling cyclic operation of the hydro-pneumatic system. After the lower chamber is filled, water is pumped to the intermediate chamber and released as a fountain-like jet, allowing for hydraulic and electrical energy generation.

The proposed mine hydro-pneumatic power plant combines the principles of UPSH and a modified Heron's fountain, forming a new architectural concept for underground energy storage. This approach has the potential to reduce structural complexity, mitigate ventilation requirements, and enable more efficient utilization of existing mining infrastructure.

Figure 1 demonstrates the fundamental differences between the classical scheme [3, p. 37] and the scheme based on the modified Heron fountain [4].

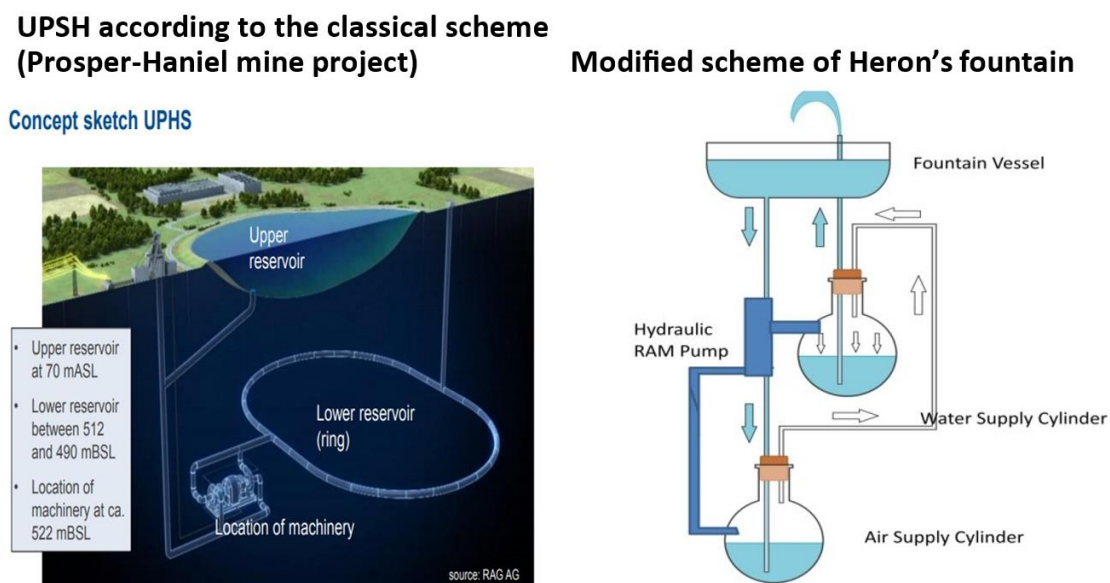


Figure 1. Classical UPSH scheme and modified Heron's fountain scheme

Figure shows the modification in conventional Heron's Fountain which involves introduction of a Hydraulic Pump between fountain vessel and air supply cylinders. This Ram Pump pumps considerable amount of water directly into water supply cylinder and thus makes it to operate in closed loop manner.

The Heron's fountain scheme enables the placement of turbines and generators on the surface rather than underground, which significantly simplifies and reduces the cost of the power plant structure and enhances operational safety.

REFERENCES

1. Menendez, J., Fernandez-Oro, J. M., Galdo, M., & Loreda, J. (2019). Pumped-storage hydropower plants with underground reservoir: Influence of air pressure on the efficiency of the Francis turbine and energy production. *Renewable energy*, 143, 1427-1438. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.05.099>
2. Heron's Fountain problem solved!!! URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Sv9JrnnZkLA> [accessed Feb 23 2026].
3. Entwicklung eines realisierungskonzeptes für die nutzung von anlagen des steinkohlebergbaus als unterirdische pumpspeicherkraftwerke (Zusammenfassender Abschlussbericht). URL: http://www.upsw.de/files/artikelbilder/Dokumente_und_Screenshots_28.01.2014/20160822_UPSW_Zusammenfassung.pdf [accessed Feb 23 2026].
4. Tanaji, K. A., & Dhondiram, P. M. (2020, October). Exploring Opportunities in Hydro Electric Power Plant with Heron's Fountain. In *Proceedings of International Conference on Recent Trends in Machine Learning, IoT, Smart Cities and Applications: ICMISC 2020* (pp. 189-201). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-7234-0_16

УДК 004.62:504.3.054

МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ПЕРВИННОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ У ЗАДАЧАХ МОНІТОРИНГУ ЗАБРУДНЕННЯ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОКОЛІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ

С. І. Ковтун¹, Ю. В. Куц², Б. Б. Млинко³, М. Є. Фриз⁴

^{1,2,4}Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

²НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", Берестейський пр., 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: ⁴mykh.fryz@gmail.com

Обґрунтовано вибір методів первинної обробки даних сенсорів в системі моніторингу якості атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики. Запропоновано сучасні програмні інструменти, які дозволяють здійснювати таку обробку.

Ключові слова: енергоефективність, енергетична інформатика, моніторинг, забруднення повітря, аналіз даних, часові ряди.

METHODS AND SOFTWARE FOR PRIMARY DATA PROCESSING IN THE TASK OF AIR POLLUTION MONITORING IN THE VICINITY OF ENERGY FACILITIES

S. Kovtun¹, Y. Kuts², B. Mlynko³, M. Fryz⁴

^{1,2,4}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. Beresteyskiy, Kyiv, Ukraine, 03056

^{3,4}Ternopil Ivan Puluj National Technical University, 56 Ruska str., Ternopil, Ukraine, 46001
phone: +38(0352)519714, e-mail: ⁴mykh.fryz@gmail.com

The choice of methods for primary processing of sensor data in the system for monitoring the quality of atmospheric air in the vicinity of energy facilities is justified. Modern software tools that allow such processing are proposed.

Key words: energy efficiency, energy informatics, monitoring, air pollution, data analysis, time series.

ORCID: ¹0000-0002-8493-9474; ²0000-0002-8493-9474; ³0000-0003-0780-5365; ⁴0000-0002-8720-6479.

Моніторинг забруднення атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики, поряд із вирішенням задач охорони довкілля, є також одним із факторів підвищення енергоефективності, адже надає об'єктивні дані про наслідки роботи обладнання та дозволяє швидко виявляти режими, що супроводжуються перевитратами палива й зайвим власним споживанням. Моніторинг є джерелом великих масивів вимірювань, що опрацьовуються інформаційними системами, а методи аналізу даних використовуються для прогнозування викидів, виявлення аномалій, оптимізації керування в реальному часі та підтримки рішень, що одночасно підвищують енергоефективність і зменшують вплив на довкілля. Таким чином моніторинг забруднення атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики тісно пов'язаний із задачами енергетичної інформатики.

Сенсорні системи моніторингу якості атмосферного повітря формують потоки даних, що мають типові особливості: високу частоту вимірювань, нерівномірність у часі, пропуски, дублікати, а також вплив шуму та збоїв живлення чи зв'язку. Первинні дані часто зберігаються у форматі CSV як найпростіший і найпоширеніший обмінний формат для інструментальних вимірювань. Водночас CSV не гарантує коректності типів, часових зон, одиниць вимірювання чи синхронізації. Тому первинна обробка є критичним етапом, що забезпечує придатність даних для подальшого аналізу, порівняння з нормативами, побудови трендів і виявлення аномалій.

Для вирішення завдань імпорту, очищення та аналізу сенсорних даних стандартом де-факто є мова програмування Python та її спеціалізована екосистема бібліотек. Вибір конкретних інструментів базується на їхній ефективності при роботі з часовими рядами. Методи та програмні засоби моніторингу якості атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики повинні бути інтегровані в загальну концепцію дослідження функціонування об'єктів енергетики [1, 2]. На нашу думку доцільно використовувати такі методи програмні засоби первинної обробки.

Бібліотека pandas – це основний інструмент для роботи з табличними даними. Вона ідеально підходить для обробки файлів формату CSV завдяки вбудованим оптимізованим функціям читання. У контексті моніторингу якості

атмосферного повітря головною перевагою *pandas* є потужний функціонал для роботи з часовими рядами. Бібліотека *matplotlib* відповідає за створення статичних, анімованих та інтерактивних візуалізацій. Бібліотека *statsmodels* – це інструмент, необхідний для більш глибокого статистичного аналізу на етапі оцінки якості даних. Він дозволяє розкласти часовий ряд на компоненти (тренд, сезонна компонента, залишок), що допомагає відрізнити реальні добові коливання рівня забруднення від апаратного шуму сенсора чи аномальних викидів. Крім того є можливість використовувати моделі з циклостационарними властивостями, які характерні як для процесів енергоспоживання так і для динаміки забруднень повітря [3, 4].

Попередня обробка даних відбувається у такій послідовності. Перший крок - коректне завантаження CSV-даних із явним визначенням стовпців часу, числових полів концентрацій (наприклад, PM2.5, PM10, NO2), одиниць вимірювання та розділювачів. Типові проблеми: різні формати часу, некоректні рядки (наприклад, "nan", "-", "error"), дублікати часових міток. На цьому ж етапі вводяться базові правила контролю якості: допустимі діапазони значень, маркування підозрілих вимірювань. Для сенсорів якості атмосферного повітря важливо відділити явно некоректні значення (негативні концентрації, технічні коди помилки) від потенційно реальних піків забруднення.

Сукупність методів попереднього опрацювання даних вказаними вище програмними засобами включає, перш за все, агрегацію, інтерполяцію, редискретизацію та візуалізацію реалізацій досліджуваних часових рядів.

Сенсори моніторингу зазвичай фіксують дані з високою частотою. Для аналізу часто необхідно перейти до нижчої роздільної здатності: погодинних, добових або тижневих значень. Агрегація вирішує це завдання шляхом обчислення статистичних характеристик у межах заданих часових вікон. Пропуски у даних сенсорів є неминучими: вони виникають через тимчасові збої обладнання, втрату пакетів при передачі даних або планові технічні обслуговування. Для коротких пропусків (до кількох хвилин) добре підходить лінійна інтерполяція. Для сигналів із вираженою нелінійною динамікою, наприклад із добовими піками концентрацій, ефективнішою є поліноміальна або сплайн-інтерполяція. Редискретизація - це зміна часового кроку вихідного ряду. Як правило, для даних задач використовується *downsampling* (коли частота зменшується, наприклад, з хвилинних до годинних даних).

Нарешті, візуалізація є невід'ємною складовою первинної обробки даних, оскільки дозволяє швидко виявити аномалії, тренди, пропуски та ефект від застосованих методів обробки. За допомогою *matplotlib* будуються лінійні графіки часових рядів концентрацій для кожного забруднювача, що дає змогу візуально порівняти сирі та оброблені дані. Гістограми, а також ядерні оцінки щільності розподілу дозволяють оцінити статистичні характеристики вимірювань і виявити мультимодальні розподіли, що можуть свідчити про різні джерела забруднення.

Таким чином, дані з сенсорів якості повітря, отримані у форматі CSV, вимагають обов'язкової підготовки перед їх використанням у системах моніторингу. Використання бібліотеки *zandas* дозволяє ефективно вирішити проблему нерівномірності надходження даних через процеси редискретизації та агрегації. Методи інтерполяції забезпечують неперервність часового ряду, усуваючи пропуски від тимчасових втрат зв'язку. Водночас візуалізація за допомогою *matplotlib* гарантує прозорість процесу очищення та допомагає виявити апаратні помилки. Запропонований програмно-методологічний стек є оптимальним, надійним та достатнім для побудови якісних процедур опрацювання даних, отриманих під час моніторингу забруднень повітря в околі об'єктів енергетики.

ПОСИЛАННЯ

1. В. П. Бабак, Ю. В. Куц, М. В. Мислович, М. Є. Фриз, and Л. М. Щербак, Об'єктно-орієнтована ідентифікація стохастичних шумових сигналів. Київ: Наукова 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, "The Concept of Research of the Electric Power Facilities Functioning," in *Systems, Decision and Control in Energy VI. Studies in Systems, Decision and Control*, V. Babak and A. Zaporozhets, Eds., Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, pp. 3–33. doi: 10.1007/978-3-031-68372-5_1.
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.

УДК 697.329

ДЕЯКІ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ТА ДІАГНОСТУВАННЯ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

В. М. Зварич^{1,2}, Ю. І. Гижко¹, Л. Б. Остапчук¹, Г. А. Кузік¹

¹Інститут електродинаміки НАН України,
пр.Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com
²Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
Вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна

В доповіді розглядаються деякі методи накопичення електроенергії. Відзначено велику роль в надійному енергетичному забезпеченні використання систем контролю та діагностування технічного стану систем з відновлюваними джерелами енергії та систем діагностування накопичувачів енергії.

Ключові слова: системи контролю та діагностування, технічний стан, енергетичне обладнання, системи з відновлюваними джерелами енергії, накопичувачі енергії.

SOME CONTROL AND DIAGNOSTIC SYSTEMS FOR ELECTRICITY STORAGE SYSTEMS

V.M. Zvaritch¹, Y.I. Gyzhko², L.B. Ostapchuk³, G.A. Kuzik⁴

¹ Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteyskiy Ave., 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, Metrolozhichna St., Kyiv, Ukraine, 03143

The report discusses some methods of electricity storage. It is remarked a great role in reliable energy supply of the use of systems for monitoring and diagnosing the technical condition of systems with renewable energy sources and systems for diagnosing energy storage devices was noted.

Key words: control and diagnostic systems, technical condition, energy equipment, systems with renewable energy sources, energy storage devices.

ORCID: ¹ <https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>, ² <https://orcid.org/0000-0002-5702-4738>,
³ <https://orcid.org/0000-0002-5565-0313>

Використання систем з відновлюваними джерелами та накопичувачами електроенергії великої потужності має велике значення, особливо в повоєнний час. Але їх використання має як великі переваги так і деякі труднощі. Одним з напрямів подолання яких є контроль і діагностика. Для контролю накопичувачів при їх роботі в статичних режимах методи контролю, в основному, засновані на прямому вимірі напруги, струму та залишкової ємності. При оперативному контролі параметри накопичувачів енергії частіше всього визначають імпульсними методами, де порівнюють короткочасні зовнішні імпульси струму або напруги з параметрами накопичувача. Іноді використовують гальваностатичний і потенціостатичний (одно- та багато-імпульсні) методи. Тут сигнали відгуку представлені тимчасовими залежностями напруги або струму для гальваностатичного та потенціостатичного методів, відповідно.

Прогностична аналітика, реалізована за допомогою алгоритмів машинного навчання, значно покращує короткострокові графіки шляхом динамічного прогнозування попиту на енергію та моделей генерації відновлюваної енергії, як показують нейронні мережі, які прогнозують попит на тепло від комбінованих теплоелектростанцій (ТЕЦ) з похибкою менше 5% [1]. В роботі [2] розглянуто деякі особливості систем контролю накопичення енергії таких як акумуляторні батареї, суперконденсаторні системи накопичення енергії, системи накопичення енергії за допомогою стисненого повітря. В [3] приведена нова технологія контролю накопичувачів за допомогою маховика.

При проектуванні енергосистем з відновлюваними джерелами і накопичувачами пріоритет мають ефективність, масштабованість та адаптованість до різних джерел. Також пріоритетними є контроль помилок і стійкість системи, що забезпечує надійну роботу в різних екологічних умовах. З метою максимізації захоплення, зберігання та розподілу енергії при збереженні стабільності мережі, метою є створення структури [4].

Для прогнозування енергоспоживання, максимізації циклів заряджання-розряджання та поліпшення загальної продуктивності системи створюються кодові бази, які забезпечують безперебійну комунікацію між різними елементами, такими як джерела відновлюваної енергії, контролери енергомережі та системи управління акумуляторними батареями. Точність показань датчиків гарантується процесами калібрування, а енергоефективне кодування сприяє стабільному функціонуванню системи.

Важливим компонентом досліджень і розробок у сфері зберігання енергії є створення зрозумілого інтерфейсу користувача для моніторингу та контролю в режимі реального часу. За допомогою такої програми користувачі можуть відстежувати виробництво відновлюваної енергії, бачити кількість збереженої енергії та стежити за загальною роботою системи. Завдяки доданій функції зворотного зв'язку користувачі можуть пропонувати покращення та ділитися своїми думками щодо правильності роботи системи.

На останніх етапах проводяться всебічні випробування, щоб гарантувати точність, надійність та ефективність системи зберігання відновлюваної енергії. Надійність системи підтверджується шляхом моделювання різних сценаріїв, таких як зміни у виробництві відновлюваної енергії, і після того, як вона задовольняє вимоги до продуктивності. Після впровадження постійний моніторинг забезпечує ефективне зберігання та розподіл відновлюваної енергії, покращуючи загальну енергетичну стійкість. На основі результатів тестування оптимізація включає вдосконалення користувацьких інтерфейсів, модифікацію порогових значень та точне налаштування алгоритмів. Система вводиться в експлуатацію в реальних умовах після того, як вона задовольняє вимогам до продуктивності. Після впровадження постійний моніторинг гарантує, що система може ефективно зберігати та розподіляти відновлювану енергію, одночасно покращуючи загальну енергетичну стійкість.

Приведено деякі порівняльні характеристики систем накопичення електроенергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Paul Afreh¹, Lizhen Gao², Beni Jared Passi¹, Chukwubuike Chiemelie Onwuagbu¹ Future energy storage: technologies, management systems, and pathways for sustainable integration ACADEMIA GREEN ENERGY Review Article Published: 2025-04-02 <https://doi.org/10.20935/AcadEnergy7640>
2. Sneha Patil et al. Various Energy Storage Devices and Their Control Techniques (IJITR) International journal of innovative technology and research Vol. 2, Issue 5, August – September 2014, 1207 – 1213. <http://www.ijitr.com>
3. K. Berabez, I. . Hacini, F. . Hamoudi, and K. . Idjdarene, "Enhancement DTC Control for SEIG in Variable-Speed Wind Turbines, Associated with an Energy Storage System", J. Ren. Energies, vol. 1, no. 1, pp. 87 – 97, May 2024, doi: 10.54966/jreen.v1i1.1175.
4. Lakshmi Poorani.S, Jeya Rani.S, Dr. R. Ravi, Madhu Varsha.M.C, Abdul Malik.R Review Of Renewable Energy Storage Research And Development. International Journal On Engineering Technology and Sciences – IJETS, Vol. XI, Issue I, January – 2024, <https://ijets.in/Downloads/Published/E0202401004.pdf>

РОЗВИТОК СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ У СВІТІ ТА УКРАЇНІ

Ю. М. Балтовський

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20-а, м. Київ, 02094, Україна,
тел.: (097) 292-37-77, e-mail: baltovsky@gmail.com*

У даній доповіді розглядаються світові тенденції та напрями розвитку систем накопичення енергії, їх особливості в Україні, проблеми та виклики, перспективи.

Ключові слова: *battery energy storage system (BESS), системи накопичення енергії, гідроакумулюючі електростанції, літій-іонні батареїні системи, водневі технології.*

Актуальність теми

Світовий енергетичний сектор переживає трансформацію, пов'язану з:

- декарбонізацією економіки,
- зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ),
- підвищенням вимог до надійності та гнучкості енергосистем.

Виробництво сонячної та вітрової енергії має нестабільний характер, що створює проблему балансування мереж. Саме тому системи накопичення енергії (Energy Storage Systems, ESS) стають ключовим елементом сучасної енергетики.

Світові тенденції розвитку

1. Домінуючі технології:

- Гідроакумулюючі електростанції (ГАЕС)
Найбільша частка світових потужностей накопичення припадає саме на ГАЕС.
Приклад – Bath County Pumped Storage Station (США).
- Літій-іонні батареїні системи (BESS)
Найдинамічніше зростаючий сегмент.
Показовий приклад – Hornsdale Power Reserve (Австралія), реалізований компанією Tesla.
- Альтернативні технології
 - натрій-іонні батареї (активний розвиток у Китаї),
 - ванадієві flow-батареї,
 - водневі технології (Power-to-Gas), що підтримуються на рівні Європейського Союзу.

2. Основні драйвери зростання:

- зниження вартості літій-іонних батарей (понад 80% за останнє десятиліття);
- розвиток ринку допоміжних послуг (регулювання частоти, резерв потужності);
- державні програми підтримки декарбонізації;
- інтеграція ВДЕ у національні енергосистеми.

Світовий ринок накопичувачів демонструє стабільне щорічне зростання понад 25–30%. Спостерігається перехід від короткотривалого (1–2 години) до довготривалого зберігання (4–8 годин і більше).

3. Розвиток систем накопичення енергії в Україні

Україна має потужний досвід використання гідроакумулюючих електростанцій:

- Дністровська ГАЕС – одна з найбільших у Європі;
- Ташлицька ГАЕС.

ГАЕС традиційно використовувались для покриття пікових навантажень та регулювання частоти.

4. Новий етап розвитку (після 2022 року)

В умовах воєнних руйнувань енергетичної інфраструктури суттєво зросла потреба в:

- швидкодіючих системах балансування;
- резервному живленні критичної інфраструктури;
- децентралізованих джерелах енергії.

Укренерго ініціює створення повноцінного ринку допоміжних послуг, що відкриває можливість участі батарейних накопичувачів у балансуванні системи.

У 2023–2024 роках прийнято нормативні зміни, які визначили правовий статус установок зберігання енергії та дозволили їх інтеграцію в ринок електроенергії.

5. Основні напрями розвитку в Україні:

- Промислові BESS (5–100 МВт) – для участі в ринку допоміжних послуг.

- СЕС + накопичувач – оптимізація графіків генерації.
- Мікромережі для громад – підвищення енергетичної стійкості.
- Системи для об'єктів критичної інфраструктури.

6. Проблеми та виклики

- висока капіталомісткість проєктів;
- залежність від імпортованих технологій;
- потреба у вдосконаленні тарифної політики;
- необхідність інтеграції з європейським енергоринком ENTSO-E.

7. Перспективи

Світ:

- масштабування довготривалого зберігання (8–24 години);
- розвиток натрій-іонних та водневих технологій;
- цифровізація та використання AI для оптимізації роботи накопичувачів.

Україна:

- активне впровадження BESS у 2025–2030 роках;
- інтеграція до європейського енергетичного простору;
- формування внутрішнього ринку накопичувачів;
- підвищення енергетичної незалежності та стійкості.

7. Висновки

Системи накопичення енергії є ключовим інструментом енергетичного переходу.

Світовий ринок демонструє стрімке зростання та технологічну диверсифікацію.

Україна має значний потенціал завдяки існуючим ГАЕС та новим батарейним проєктам.

Подальший розвиток накопичувачів є стратегічним фактором енергетичної безпеки держави.

ПОСИЛАННЯ

1. Papadakis, C. N., Fafalakis, M., & Katsaprakakis, D. (2023). A review of pumped hydro storage systems. *Energies*, 16(11), 4516. <https://doi.org/10.3390/en16114516>
2. Faisal, S. (2024). A comprehensive review of integrated energy systems considering power-to-gas technology. *Energies*, 17(18), 4551. <https://doi.org/10.3390/en17184551>
3. Жаркін, А. Ф., Попов, В. А., Ярмолук, О. С., & Наталич, В. О. (2022). Особливості побудови та використання систем накопичення енергії у розподільних мережах. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (4), 7–16.
4. Касаткіна, І. В., & Левченко, Р. О. (2021). Сучасні системи накопичення електричної енергії та їх роль у розвитку відновлюваної енергетики. *Вісник НГУ*, (3), 85–92.
5. Мирутенко, П. П., & Лістовщик, Л. К. (2022). Накопичувачі енергії: Основні типи та перспективи використання. *Енергетика: економіка, технології, екологія*, (3), 23–31.
6. Олефір, В. (2020). Prospects of the use of lithium in energy storage systems. *Наукові записки МАН України*, (12), 45–52.
7. Хадарцев, О., & Убийвовк, І. (2023). Перспективи розвитку установок зберігання енергії в Україні. *Економіка та суспільство*, (47), 1–8.
8. Шпак, В. В., Романюк, В. Т., & Зінкевич, П. О. (2021). Інноваційні технології та перспективи систем накопичення енергії в електроенергетиці. *Наукові праці НУХТ*, 27(5), 112–120.
9. Li, X., & Palazzolo, A. (2021). A review of flywheel energy storage systems: State of the art and opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135, 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110123>
10. Zgurovets, O., et al. (2022). Analysis of global trends in the development of energy storage systems and prospects for their implementation in Ukraine. In *Power Systems Research and Operation Studies* (pp. 215–230). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9888-8_12
11. 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).
12. 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 621.311.25

ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ТА ЗЕЛЕНИЙ ВОДЕНЬ У СТРУКТУРІ ПІСЛЯВОЄННОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ АРХІТЕКТУРИ УКРАЇНИ

С. О. Кудря¹, О. В. Зур'ян²

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, Україна
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

У роботі розглянуто роль відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) у формуванні нової енергетичної архітектури України в умовах воєнних викликів та післявоєнного відновлення. Проаналізовано проблеми інтеграції ВДЕ до Об'єднаної енергетичної системи України, зокрема питання гнучкості та балансування генерації. Обґрунтовано доцільність розвитку зеленого водню як стратегічного інструменту довгострокового акумулювання енергії та декарбонізації промисловості й транспорту. Наведено результати геопросторової оцінки технічного потенціалу сонячної та вітрової генерації у розрізі територіальних громад України як основи для моделювання виробництва зеленого водню.

Ключові слова: відновлювана енергетика, зелений водень, електроліз, декарбонізація, енергетична безпека, технічний потенціал, ГІС-аналіз

RENEWABLE ENERGY SOURCES AND GREEN HYDROGEN IN THE STRUCTURE OF THE POST-WAR ENERGY ARCHITECTURE OF UKRAINE

Kudrya S. ¹, Zurian O. ²

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
02094, 20A Hnata Khotkevycha St., Kyiv, Ukraine
phone: (044) 206-28-09, e-mail: alexey_zuryan@ukr.net

The paper examines the role of renewable energy sources (RES) in shaping the new energy architecture of Ukraine in the context of military challenges and post-war recovery. The problems of integrating RES into the Unified Energy System of Ukraine are analyzed, in particular the issues of flexibility and generation balancing. The feasibility of developing green hydrogen as a strategic tool for long-term energy accumulation and decarbonization of industry and transport is substantiated. The results of a geospatial assessment of the technical potential of solar and wind generation in the context of territorial communities of Ukraine are presented as a basis for modeling the production of green hydrogen.

Keywords: renewable energy, green hydrogen, electrolysis, decarbonization, energy security, technical potential, GIS analysis

ORCID: ¹0000-0000-0000-0000; ²0000-0000-0000-0000.

Світова енергетика перебуває у фазі глибокої структурної трансформації, спрямованої на декарбонізацію, зниження залежності від викопних енергоносіїв та підвищення енергетичної безпеки. У 2024 році глобальна генерація електроенергії досягла близько 30,9 тис. ТВт·год, з яких 31,9 % було забезпечено відновлюваними джерелами енергії. У країнах Європейського Союзу протягом 2021–2024 років щорічні введення нових потужностей ВДЕ більш ніж удвічі перевищили рівень 2021 року, що підтверджує незворотність курсу на кліматичну нейтральність. Україна, інтегрована до європейського енергетичного простору та синхронізована з ENTSO-E, є невід'ємною частиною цього процесу, проте для неї розвиток ВДЕ має також вимір національної безпеки.

До 2022 року встановлена потужність відновлюваної генерації в Україні становила близько 9,7 ГВт, а з урахуванням великих гідроелектростанцій — понад 14 ГВт. Період 2017–2021 років характеризувався активним інвестиційним зростанням, зумовленим механізмом «зеленого тарифу», що забезпечив швидке нарощування сонячних і вітрових електростанцій, значною мірою за участі іноземного капіталу. Повномасштабна агресія та масовані атаки на енергетичну інфраструктуру продемонстрували вразливість централізованої моделі енергосистеми та актуалізували потребу у децентралізації та диверсифікації джерел енергії. Водночас сектор ВДЕ продемонстрував

стійкість: у 2022–2023 роках введено понад 650 МВт нових потужностей, зокрема 371 МВт сонячних станцій (287 МВт — домогосподарствами), 227 МВт вітрових електростанцій та 50 МВт біоенергетичних об'єктів. У 2024 році встановлено ще 945 МВт розподіленої генерації, з яких 670 МВт становили ВДЕ. У 2025 році вітроенергетика продемонструвала суттєвий приріст — 324 МВт нових потужностей, а загалом за 2023–2025 роки введено близько 600 МВт вітрової генерації. Таким чином, навіть в умовах війни відновлювана енергетика виконує функцію підтримання енергетичної стабільності та розвитку.

Зі зростанням частки змінної генерації загострюються системні виклики інтеграції ВДЕ до Об'єднаної енергетичної системи України. Серед них — обмежена пропускна спроможність мережевої інфраструктури в районах концентрації генерації, непостійність виробітку у добовому та сезонному розрізі, потреба у додатковій резервній потужності та вплив на балансову надійність системи. Для забезпечення гнучкості застосовуються міжсистемні зв'язки з ENTSO-E, швидкодіючі електростанції, обмеження потужності ВДЕ, розвиток розосередженої генерації та систем накопичення енергії. Однак зазначені механізми переважно вирішують короткострокові дисбаланси і не забезпечують повноцінного покриття сезонних коливань виробітку.

У цьому контексті зелений водень розглядається як стратегічний інструмент довгострокового акумулювання енергії та міжсекторальної інтеграції. Виробництво зеленого водню шляхом електролізу води з використанням електроенергії від сонячних і вітрових електростанцій дозволяє перетворювати надлишкову електроенергію на універсальний енергоносіє. Отриманий H_2 може використовуватися безпосередньо або перетворюватися на синтетичні палива та зелений аміак для транспортування та спеціалізованого застосування. Транспортування можливе трубопроводами, морськими шляхами або автотранспортом, а зберігання — у спеціалізованих сховищах або з використанням модернізованої газотранспортної системи. Використання зеленого водню охоплює металургію, хімічну промисловість, транспорт, системи опалення та виробництво електроенергії, що забезпечує суттєве скорочення викидів парникових газів. Крім екологічного ефекту, розвиток водневої економіки може забезпечити додатковий приріст ВВП на рівні 4–6 % до 2030 року та 12–15 % до 2050 року, створити новий інноваційний сектор економіки та сприяти залученню інвестицій.

Європейські стратегічні документи, зокрема EU Hydrogen Strategy та ініціатива «2x40 ГВт», передбачають до 2030 року розгортання 40 ГВт електролізерів у ЄС та ще 40 ГВт у сусідніх регіонах. Для України визначено потенціал близько 10 ГВт електролізерних потужностей, з яких 8 ГВт можуть бути орієнтовані на експорт, а 2 ГВт — на внутрішні потреби. Наявність однієї з найбільших газотранспортних систем у світі, значного сонячного та вітрового потенціалу і достатніх водних ресурсів створює об'єктивні передумови для інтеграції України до європейського водневого ринку.

Дослідження водневої тематики в Інституті відновлюваної енергетики НАН України мають системний і багаторічний характер. Роботи у сфері поєднання відновлюваних джерел енергії з електролізними технологіями розпочалися ще на початкових етапах становлення сучасної вітроенергетики в Україні. За участі фахівців IBE НАН України була запроваджена перша в Європі вітро-воднева електростанція (Nordec Folkecenter, Denmark). А також разом з Інститутом проблем матеріалознавства ім. І.М. Францевича НАН України та Інститутом проблем машинобудування ім. А.М. Підгорного НАН України виконувалися роботи по дослідженню отримання водню з використанням електролізера та вітроустановки. У межах наукових програм НАН України виконувалися дослідження режимів роботи вітроелектростанцій у складі воднево-енергетичних комплексів, моделювалися процеси виробництва та зберігання водню, а також оцінювалася можливість його використання як проміжного енергоносія для підвищення гнучкості енергосистеми. Інститут брав участь у формуванні концептуальних засад розвитку водневої енергетики України, підготовці аналітичних матеріалів та експертному супроводі нормативно-стратегічних документів, зокрема Водневої стратегії України. Таким чином, сучасні дослідження у сфері просторового оцінювання потенціалу виробництва зеленого водню є логічним продовженням і розвитком раніше сформованої наукової школи та накопиченого досвіду.

У 2025 році в Інституті відновлюваної енергетики НАН України виконано перше національне геопросторове оцінювання технічного потенціалу сонячної та вітрової генерації у розрізі територіальних громад. Методика передбачала збір супутникових кліматичних даних, маскування екологічно та технічно непридатних земель, відсікання ділянок площею менше 0,15 га, усунення вузьких геометричних коридорів та статистичну агрегацію ресурсів. Отримано відтворювану просторово-статистичну ресурсну базу, яка формує основу для режимного та економічного моделювання живлення електролізерів. Попередні розрахунки свідчать, що потенційний середньорічний ресурс виробництва зеленого водню може сягати до 45 млн тонн, що суттєво перевищує прогнозований внутрішній попит та створює значний експортний потенціал.

Наукова новизна роботи полягає у:

1. Формуванні першої в Україні національної просторово деталізованої бази технічного потенціалу ВДЕ у розрізі територіальних громад.

2. Розробці та апробації методики геопросторового очищення та статистичного агрегування ресурсів сонячної й вітрової енергії з урахуванням екологічних та технічних обмежень.
3. Обґрунтуванні використання отриманих просторових даних як ресурсної основи для моделювання виробництва зеленого водню та формування нової енергетичної архітектури.
4. Інтеграції підходів розвитку ВДЕ та водневої енергетики у контексті післявоєнного відновлення та європейської інтеграції України.

Висновок.

1. Відновлювані джерела енергії є фундаментом формування нової стійкої енергетичної системи України. Розвиток зеленого водню дозволяє вирішити проблему довгострокового акумулювання енергії, забезпечити декарбонізацію ключових секторів економіки та сформувати новий інноваційний напрям розвитку.
2. Поєднання науково обґрунтованої оцінки потенціалу ВДЕ, просторово деталізованого аналізу та інтеграції водневих технологій створює передумови для формування децентралізованої, гнучкої та інтегрованої з ЄС енергетичної архітектури України.

ПОСИЛАННЯ

1. Hydrogen Europe. (2025). HyPotential Hydrogen Infrastructure Map. Retrieved June 10, 2025, from <https://www.h2inframap.eu/>
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). (2019). Hydrogen: A renewable energy perspective. Abu Dhabi: IRENA. Retrieved from <https://www.irena.org/publications/2019/Sep/Hydrogen-A-renewable-energy-perspective>
3. Kudrya, S., Zurian, O., Zurian, O. Principles of forming an investment attractiveness layer in a GIS map of green hydrogen energy projects. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2025, No. 3(82), pp. 145–154. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).145-154](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).145-154)
4. Kudrya S. O., Repkin O. O., Yatsenko L. V., Shynkarenko L. Ya., Tkalenko M. A. Concept of a roadmap for the development of hydrogen energy in Ukraine for the period until 2035. *Renewable Energy*. 2019. No. 4. P. 22–28. Access mode: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vien_2019_4_5
5. Mkhitarian, N., Kudria, S., Zurian, O. Concept of creating an interactive map of investment attractiveness of green hydrogen in Ukraine. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2025, No. 2(81), pp. 151–161. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).151-161](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).151-161)
6. Nasser, M., & Hassan, H. (2024). Feasibility analysis and atlas for green hydrogen project in MENA region: Production, cost, and environmental maps. *Solar Energy*, 268, 112326. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112326>
7. Riepin, O. Aspects of the development of hydrogen energy in Ukraine by using energy from renewable sources. *Vidnovliuvana Enerhetyka (Renewable Energy)*, 2023. Available online: <https://ve.org.ua/index.php/journal/article/view/417>
8. Timmeberg, S., & Kaltschmitt, M. (2025). Hydrogen from renewables: Supply from North Africa to Central EU as blend in existing pipelines. Potentials and costs. *Applied Energy*, 237, 795–809. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.030>
9. United Nations Economic Commission for Europe. Hydrogen Roadmap Draft Report for Ukraine. Draft report. Geneva: UNECE, 2021. Available online: https://unece.org/sites/default/files/202103/Hydrogen%20Roadmap%20Draft%20Report_UKR%20March%202021.pdf

УДК 620.9:621.1:621.31

РОЛЬ МІКРО-ТЕС З ДВИГУНАМИ СТІРЛІНГА У ЗАБЕЗПЕЧЕННІ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СТІЙКОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Є. С. Нікітін¹, В. М. Павленко²

*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 розглядається роль мікро-ТЕС на основі двигунів Стірлінга як критичного елемента децентралізованої енергетики. Проаналізовано їхній потенціал у забезпеченні енергетичної незалежності та стійкості локальних об'єктів шляхом комбінованого виробництва енергії.

Ключові слова: *двигун Стірлінга, мікро-ТЕС, децентралізація, енергетична стійкість, когенерація, локальні системи енергопостачання, енергоефективність.*

THE ROLE OF MICRO-TPP WITH STIRLING ENGINES IN ENSURING ENERGY SUSTAINABILITY OF LOCAL FACILITIES IN THE CONDITIONS OF DECENTRALIZATION OF ENERGY SYSTEMS

Y. S. Nikitin¹, V. M. Pavlenko²

*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 examines the role of micro-thermal power plants based on Stirling engines as a critical element of decentralized energy. Their potential in ensuring energy independence and the sustainability of local facilities through combined energy production is analyzed.

Key words: *Stirling engine, micro-thermal power plant, decentralization, energy sustainability, cogeneration, local energy supply systems, energy efficiency.*

ORCID: ¹ 0009-0003-4000-3193; ² 0000-0003-2163-8508.

Проблема децентралізації енергетики України сьогодні розглядається крізь призму використання газотурбінних та газопоршневих установок, які здатні забезпечити швидке розгортання потужностей. Проте для локальних об'єктів малого масштабу (приватні будинки, фермерські господарства, невеликі комунальні заклади) використання великих газових установок не завжди є технічно та економічно обґрунтованим. Двигуни Стірлінга пропонують унікальну перевагу — зовнішнє згоряння палива, що дозволяє інтегрувати їх із системами спалювання біомаси, сонячними концентраторами або установками утилізації надлишкового тепла промислових процесів.

Аналіз світового досвіду свідчить, що комбіновані системи виробництва енергії з двигунами Стірлінга демонструють високу адаптивність до локальних умов. Зокрема, у країнах ЄС такі системи активно використовуються в межах концепції Smart Grid для балансування пікових навантажень. Дослідження підтверджують, що електричний ККД сучасних установок Стірлінга може перевищувати 25%, а за умови повної утилізації теплової енергії (режим когенерації) загальна ефективність системи сягає 90% [1]. Це робить їх конкурентоспроможними порівняно з традиційними двигунами внутрішнього згоряння.

Техніко-економічна ефективність таких систем в Україні значною мірою залежить від вартості паливних ресурсів та капітальних витрат на обладнання. Попри те, що початкові інвестиції в «стірлінг-технології» залишаються відносно високими через складність виготовлення високотемпературних теплообмінників, вони компенсуються тривалим міжремонтним ресурсом та відсутністю потреби у дорогому сервісному обслуговуванні, характерному для газопоршневих агрегатів. Застосування двигунів Стірлінга в локальних мережах дозволяє не лише забезпечити автономність, а й суттєво знизити викиди вуглекислого газу [2], у порівнянні зі стандартними рішеннями на природному газі.

Важливим аспектом енергетичної стійкості є можливість роботи мікро-ТЕС у режимі «острова». Двигуни Стірлінга відрізняються низьким рівнем шуму та вібрацій, що дозволяє розміщувати їх безпосередньо у житлових зонах

або поблизу лікарень, де діють суворі акустичні обмеження. Це створює надійний енергетичний базис для критичної інфраструктури, незалежний від централізованих постачань газу чи електроенергії, особливо при використанні місцевих видів палива (пелети, щепи) або енергії сонця.

Перспективи розвитку технології пов'язані з автоматизацією та впровадженням інтелектуальних систем керування на основі алгоритмів машинного навчання, що дозволяють оптимізувати роботу установок в реальному часі залежно від профілю споживання енергії. Інтеграція таких систем у локальні енергокомплекси дозволяє створювати стійкі мікромережі, здатні до самовідновлення та ефективного розподілу ресурсів.

Висновки

Двигун Стірлінга є ключовим елементом підвищення енергоефективності та стійкості локальних систем енергопостачання. Завдяки своїй універсальності щодо джерел тепла та високим екологічним показникам, вони можуть стати фундаментом для розбудови децентралізованої енергетики України. Подальші зусилля мають бути спрямовані на локалізацію виробництва компонентів двигунів та розробку типових проєктів мікро-ТЕС для різних секторів економіки.

ПОСИЛАННЯ

1. Нікітін, Є. С., & Павленко, В. М. (2025). Перспективи та техніко-економічна ефективність використання комбінованих систем з двигуном Стірлінга. У *Технічна Творчість* (№ 9, с. 73). Хмельницький національний університет. <https://elar.khmnpu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/7435dbe1-ea68-4f79-b03f-5676ce127415/content#page=74>
2. Kramens, J., Svedovs, O., Sturmane, A., Vigants, E., Kirsanovs, V., & Blumberga, D. (2024). Exploring energy security and independence for small energy users: A Latvian case study on unleashing Stirling engine potential. *Sustainability*, 16(3), article number 1224. <https://doi.org/10.3390/su16031224>
3. Nikitin, Y. (2025). Combined energy production systems with Stirling engines: Analysis of global experience and local prospects. *Technologies and Engineering*, 26(3), 66–76. <https://doi.org/10.30857/2786-5371.2025.3.5>

THE GROWTH OF RES CAPACITY IN THE POLISH ENERGY SECTOR

Artur Rusowicz

*Institute of Heat Engineering of Warsaw University of Technology,
21 Nowowiejska str., Warsaw, Poland, 00665
phone: (048) 234-52-21, e-mail: artur.rusowicz@pw.edu.pl*

Key words: *renewable energy sources (RES), energy sektor, energy policy*

ORCID: [10000-0001-7949-6907](https://orcid.org/10000-0001-7949-6907).

Abstracts of conference reports

In recent years, the development of renewable energy sources in Poland has clearly accelerated. The changes that took place between 2020 and 2025 show how quickly the importance of green energy in the power system is growing. According to data from the Energy Market Agency, in 2020, RES installations accounted for 24.12% of installed capacity, with a total capacity of 12,490 MW. By 2025, RES capacity had increased to 37,777 MW, more than tripling in a very short time [1,2]. This dynamic growth meant that in 2025, half of Poland's total installed capacity came from renewable energy sources. This is a huge change, demonstrating how quickly green energy is becoming one of the pillars of the national power system. The largest increases were recorded by technologies that have developed most rapidly in recent years. Solar farms increased their capacity from 3,960 MW to as much as 24,808 MW, and wind farms from 6,402 MW to 10,550 MW.

In parallel with the growing installation capacity, the actual energy production from RES has also significantly increased. In 2020, renewable sources generated 28,173 GWh of electricity. Five years later, in 2025, it was already 54,743 GWh – almost twice as much. This substantial growth also translated into a change in the structure of the country's total energy production. The share of green energy rose from 17.83% in 2020 to 31.41% in 2025. This means that last year, nearly one in three kilowatt-hours produced in Poland came from RES.

We have witnessed a breakthrough moment in the development of RES in Poland. For the first time in history, the share of renewable energy sources in the country's installed capacity exceeded 50%. At the end of December 2025, it stood at exactly 50.04%. Furthermore, the share of RES in electricity production in Poland reached a record 31.41% in 2025! Polish renewable sources produced nearly 55,000 GWh.

Energy data also shows that hard coal still holds the first place in Poland's energy mix (57.3 TWh) in terms of annual electricity generation. Second place goes to lignite (33.5 TWh). Next in line are: natural gas (24.3 TWh), onshore wind (23.6 TWh), and photovoltaics (20.5 TWh). In 2025, the largest decreases can be observed in electricity generation from lignite (a decrease of 2.6 TWh compared to 2024) and hard coal (a decrease of 1.8 TWh). Experts noted that energy production from onshore wind farms was also lower (a decrease of 1.1 TWh), despite new installed capacity in this technology.

For the first time in history, the share of hard coal and lignite in electricity production fell below 50% during a six-month period in 2025. At the end of the year, it stood at 52.6%. Renewable sources accounted for 31.5 percent of energy production, natural gas for 14.1 percent, and other fossil fuels – 1.8 percent.

In 2025, there was a "record-level curtailment" of RES generation. According to reports, 1.4 TWh of electricity from renewable sources did not enter the power system, with 97.8% of the lost energy being due to balancing reasons, while the remainder was attributable to grid issues.

The year 2025 represents not only a record result but, above all, clear evidence of a real and measurable transformation of the Polish energy sector. The growth in generation from renewable sources is displacing inflexible coal-fired capacity from the market, which leads to increasingly frequent instances of curtailing RES generation – due to the lack of energy storage and flexible demand. The risk of system imbalance is growing, particularly during periods of record peak demand for power. This shows that further transformation requires not only the expansion of renewable capacity, but above all the modernization of infrastructure, the development of storage, and support for flexibility on the consumer side.

REFERENCES

1. Polish Power Industry Statistics 2024, Ministry of EnergyWarsaw 2025
2. Energy Situation in Poland - National Energy Nr 3 (141) III kw. 2025

УДК 621.311.25

ВИКОРИСТАННЯ ЛІНІЙНИХ ARIMA МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВУЗЛІВ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

Д. Д. Овдій¹, В. М. Зварич^{2,3}

¹Національний університет «Києво-могилянська академія»,
вул. Григорія Сковороди, 2, м. Київ, 04070, Україна,

²Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com

³Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
Вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна

При розв'язанні задач діагностики енергетичного обладнання використовувалися методи математичного моделювання часових рядів, статистичного аналізу залишків (тести Шапіро–Вілکا, Дарбіна–Уотсона, Бройша–Пагана) та порівняльного аналізу прогностичних методів. Розрахунки виконувались у середовищі RStudio мовою R.

Ключові слова: електротехнічне обладнання, система діагностики, ARIMA-моделі, прогнозування технічного стану вузлів енергетичного обладнання.

USING LINEAR ARIMA MODELS FOR FORECASTING PARAMETERS OF TECHNICAL CONDITION IN ENERGY EQUIPMENT COMPONENTS

D.D. Ovdii¹, V. M. Zvaritch^{2,3}

¹National University of Kyiv-Mohylanska Academy,
Hryhorii Skovoroda Street, Kyiv, 04070, Ukraine

²Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteyskiy Ave., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com

³Institute of renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50, Metrolozhichna St., Kyiv, Ukraine, 03143

In solving the problems of energy equipment diagnosis, methods of mathematical modeling of time series, statistical residual analysis (Shapiro–Wilk, Durbin–Watson, and Breusch–Pagan tests), and comparative analysis of forecasting methods were used. Calculations were performed in the RStudio environment using the R programming language.

Key words: electrical equipment, diagnostic system, ARIMA models, forecasting of the technical condition of power equipment nodes.

ORCID: ² <https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>

Значна частина електротехнічного обладнання (ЕО) в Україні фізично та морально зношена, що робить повну його заміну практично неможливою через колосальні фінансові та часові витрати. Особливої гостроти ця проблема набуває в умовах воєнного часу. Альтернативою заміні є підтримання наявного обладнання в робочому стані шляхом моніторингу, своєчасної діагностики та профілактичного обслуговування. Для ефективної діагностики необхідне безперервне збирання і обробка великого масиву параметрів — електричних, магнітних, теплових, вібраційних тощо — із формуванням узагальнюючих показників технічного стану в режимі реального часу.

Метою роботи є дослідження особливостей застосування лінійних ARIMA-моделей як математичних моделей інформаційних сигналів діагностичних систем енергетичного обладнання та побудова прогнозів параметрів діагностичних ознак на основі властивостей ARIMA-процесів.

Для побудови математичних моделей діагностичних сигналів запропоновано клас лінійних процесів авторегресії (AR), які дозволяють описувати не лише гаусові, а й сигнали з безмежно-подільними законами розподілу (гамма,

пуасонівський та ін.). Модель ARMA(p, q) узагальнює AR-процес, додаючи компоненту ковзного середнього [1]. Модель ARIMA(p, d, q), запропонована Боксом і Дженкінсом, поширює ARMA на нестационарні ряди через операцію d-кратного різнення [2]. ARIMA-моделі дозволяють враховувати складні часові структури сигналів, зокрема вплив зовнішніх і внутрішніх збурень, що є особливо важливим в умовах воєнного часу.

Методика верифікації моделі. Адекватність побудованої ARIMA-моделі перевіряється за допомогою комплексу статистичних тестів. Перевірено виконання основних припущень моделі, зокрема відсутність автокореляції, гетероскедастичності, нормальності розподілу залишків та інших діагностичних критеріїв. Розрахунки виконано мовою програмування R у середовищі RStudio.

Практичну апробацію методу проведено на моделі шихтованого магнітопроводу трансформатора малої потужності (Інститут електродинаміки НАН України) [3]. Діагностичною ознакою є кількість піків спектрограми вібраційного сигналу, збудженого ударним молотком і виміряного акселерометром ABC-017. Критерій справності: середня кількість піків не перевищує 6,255. У ході 12 послідовних послаблень навантаження шпильок реєструвалась зміна діагностичного параметра. На основі цих даних у середовищі RStudio побудовано ARIMA-прогноз на 5 кроків уперед із довірчим інтервалом 95%:

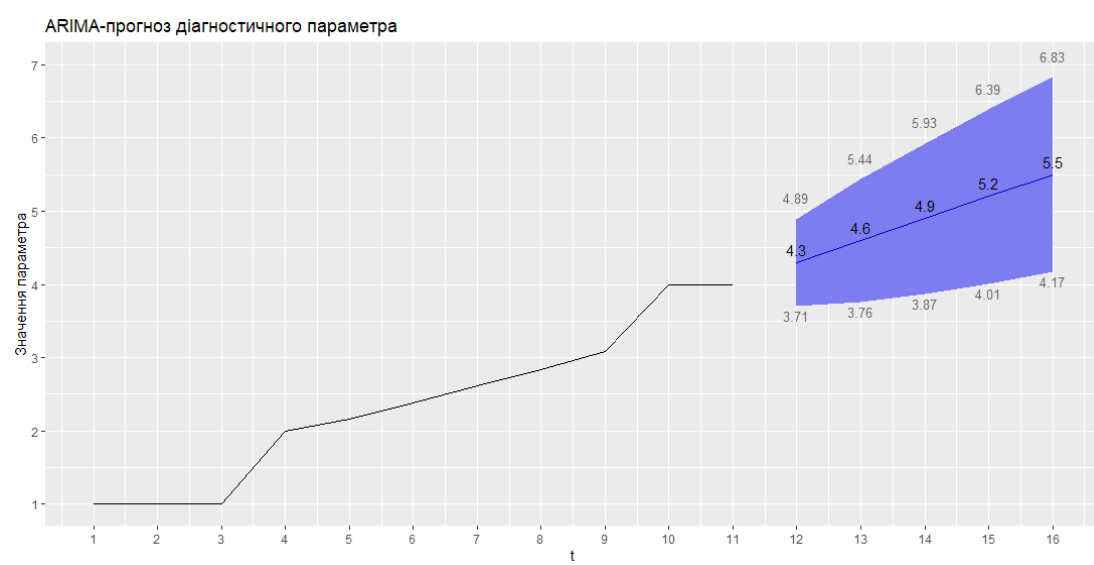


Рис. 1. Результати прогнозування діагностичного параметра з використанням ARIMA-моделі (CI 95%)

На основі отриманого прогнозу виконано порівняльне дослідження з прогнозами, побудованими за допомогою статистичних сплайнів. Результати аналізу представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняльні характеристики прогнозу методом ARIMA та статистичних сплайнів

t (відліки часу)	12	13	14	15	16
Мат. сподівання	4.3	4.6	4.9	5.2	5.5
ARIMA нижня границя	3.71	3.76	3.87	4.01	4.17
ARIMA верхня границя	4.89	5.44	5.93	6.39	6.83
Стат. сплайни нижня границя	3.8	3.9	4.0	4.1	4.2
Стат. сплайни верхня границя	4.8	5.2	5.7	6.4	7.0

ПОСИЛАННЯ

- Зварич В.М., Глазкова О.М. Дослідження можливостей використання ядер лінійних AR та ARMA процесів в якості діагностичних ознак технічного стану обертових вузлів генераторів вітроустановок. Відновлювана енергетика, 2022, № 1, стор. 66-77. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1\(68\).66-72](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68).66-72)
- Khulood Albeladi, Bassam Zafar, Ahmed Mueen, Time Series Forecasting using LSTM and ARIMA, (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 14, No. 1, 2023, pp. 313-320. <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2023.0140133>
- 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/10.1007/978-3-030-444>

UDK 621.313.322

PHYSICAL PROCESSES IN THE END PARTS OF THE STATOR OF A SYNCHRONOUS GENERATOR

K. A. Kuchynskyi

*Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteyskyi ave., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (067) 991-23-18, e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com*

The causes of damage to the end core packages of the stator and the physical processes occurring during generator operation in maneuvering modes have been analyzed, the values of mechanical movements and stresses of the elements of the end zone of the machine are established, constructive measures were considered to prevent the possibility of defects occurring.

Key words: stator core, end packages, weakening of pressing, multi-cycle frictional contact, thermomechanical movements and stresses.

ФІЗИЧНІ ПРОЦЕСИ В КІНЦЕВИХ ЧАСТИНАХ СТАТОРА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

К. А. Кучинський

*Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (067) 991-23-18, e-mail: kuchynskyy1962@gmail.com*

Проаналізовано причини пошкоджень крайніх пакетів осердя статора, фізичні процеси під час роботи генераторів у маневрених режимах експлуатації, встановлено величини механічних переміщень та напружень елементів кінцевої зони машини, розглянуто конструктивні заходи для запобігання можливості виникнення дефектів.

Ключові слова: осердя статора, крайні пакети, ослаблення пресування, багатоциклічність фрикційної взаємодії, термомеханічні переміщення та напруження.

ORCID: 0000-0003-4003-6721.

Damage to the plates of the end stator core packages is one of the most common defects in synchronous generators. This may occur due to: slight weakening of the pressing (a 1 mm thick probe penetrates the tooth to a depth of 10...15 mm with great effort); obvious loosening (individual plates can be bent); damage to some plates in the steps of the end packages; damage to individual steps of the end package; complete chipping of the tooth crown to a depth of 30...40 mm in several end packages. The electromagnetic forces acting on the loosened tooth, caused by the uneven distribution of the axial component of the scattering field induction across the width of the tooth, result in asymmetrical vibrations of individual petals and dangerous alternating bending stresses, which subsequently lead to fracture of the teeth. The phenomenon of iron plate breakage in the end packages is considered is of a fatigue nature. It is accompanied by a process of gradual accumulation of metal damage under the influence of variable stresses, changes in properties, crack formation and destruction. Overall, the magnitude of these electromagnetic forces is small, and if the pressing pressure in the package is maintained and there is no gap between the end plate and the rest of the package, intense oscillations of the end plate and dangerous stresses in it are impossible.

The loosening of the end packages begins with the loss of force contact between the compressed package and the pressure finger. This can occur when the pressure force exerted by the pressure finger on the end package is weakened as a result of the loosening or complete unscrewing of the clamping prism nut or its breakage. Therefore, during machine repairs, it is necessary to constantly restore the required pressing force. This is especially true for generators with many years of service that operate in maneuverable modes. Over decades, the interplate insulation of the active iron of the stator core loses its gluing properties and may partially deteriorate. The loosening of the end package is also facilitated by vibration, which increases when the pressing force weakened. Research has also shown that, under specified copper heating conditions, the risk of package loosening is possible on virtually all generators. Notably, for this process to begin, relatively low values – of winding temperatures are sufficient (according to calculations in the range of 25 °C...65 °C). The decisive factor is the multi-cycle frictional interaction between the insulation of the winding rod and the tooth of the end core package of the stator core and their relative movement as a result of different heating levels and thermal expansion coefficients (with weak frictional contact, the possibility of loosening the end packages is practically excluded).

The author investigated the magnitudes of thermomechanical movements and stresses in the stator winding insulation nodes when the load of a 200 MW generator was reduced [1]. In assessing the values of displacements and stresses arising in the rod owing to thermal elongation of the winding relative to the end of the core, it has been established that the most dangerous point in terms of the mechanical strength of the insulation material is where the stator winding exits the slot.

During load changes in modes ranging from idle to nominal, mutual displacement reaches 1.1 mm. According to Hooke's law, when the rod is thermally deformed by 1 mm, the axial force is approximately 13200 N. Through friction, some of this force is transferred to the plates of the end package. Its value varies for different rods, as it depends on the force used to secure each rod in the groove and on how tight the nuts on the clamping prisms are.

A computational analysis of forced oscillations of the end plate (in the case of its complete release) showed that resonant oscillations at a frequency of disturbing forces of 100 Hz occur when the length of the free console is 64 mm or more. Dangerous stresses in plates can only occur when their free ends are movements by a very large amount (around three mm). In real generators, such conditions do not exist, so it is believed that resonant oscillations of the plates are not the cause of these damages.

The assessment of inductions, disturbing forces, and plates movements at which the maximum stress values are reached in the dangerous part of the console, for the case of forced non-resonant oscillations, showed that: with a console length of about 20 mm, dangerous stresses occur at forces of about 0.025...0.05 MPa and axial inductions of 0.5...0.7 T. At the same time, the movements of the free end of the plate are 250...500 μm .

The occurrence of such conditions in real machines is possible. Field tests of the TGV-200M generator showed that the axial component of magnetic induction on the surface of the tooth zone of the end package in load modes with $\cos \phi$ close to unity reaches 0.3 T for the middle of the tooth and 0.55 T at the tip of the tooth. Measurements on the stator of the TGV-200 of the heat elongation of the winding rod at the outlet of the slot and the deflection of the end of the pressure finger also confirm the calculated estimates.

Operational experience shows that under adverse circumstances, the edge of the first plate of the end package may bend away from the adjacent plates of the package by 1...2 mm. At the same time, the release of the end plate of the tooth may occur to a length of 20 mm or more. The amount of vibration cycles of such a plate with double frequency under the action of electromagnetic forces is has about of 10^8 its exploitation time. Therefore, the stress state of the plate should be assessed from the point of view of the multi-cycle strength of the metal. For practical calculations, the maximum stress is taken as the criterion for fatigue failure, which is compared with the endurance limit and is considered responsible not only for the local mechanical condition, but also for the overall strength of the part. The end plate, which has already partially separated from the package under the action of axial electromagnetic forces, is subjected to alternating transverse bending. Taking into account the given values of electromagnetic forces on the surface of the end package and the area of the bent part of the plate on which they act, the maximum normal stresses for a rectangular plate section console are 0.13 MPa, and the maximum tangential stresses are 0.006 MPa. In connection with the small magnitude of tangential stresses, the strength calculation for transverse bending is performed only for normal stresses, as in the case of sheer bending. It is usually assumed that for high-strength steels, the bending endurance limit is approximately half of the limit strength. For electrical steel, the fatigue strength limit is 0.11 MPa. Considering that the amplitude of plate oscillations depends on the load, which is not always maximum, it can be seen that in this state of the end plate, the stresses in it can approach critical levels during the existing exploitation time of the generators.

Thus, the occurrence of loosening of the end packages largely determines the reliability of the structural elements of the end zone of the stator core. When manufacturing generators, the most effective way to prevent loosening is to glue the plates of the end packages together. The fastening system for the rods in the groove part must allow the rod to slide freely in the axial direction or compensate for its thermal deformation. As for existing machines that have reached the end of their service life, the possibilities for restoring the gluing of the end stator packages during repairs are quite limited. Therefore, practically the only means of reducing the effects of factors contributing to loosening during generator loading is to introduce cooling control of the stator winding and core [1].

REFERENCES

1. Kuchynskiy K.A. Influence of Control of Synchronous Generator Cooling on the Mechanical Characteristics of the Stator Winding. Materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century. Kyiv, Ukraine, 21–23 May 2025. Pp. 136–137.
DOI: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025>

УДК 621.311.25

ФОРМУВАННЯ ЗЕЛЕНИХ КОРИДОРІВ У ЧОРНОМУ МОРІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ВІДНОВЛЕННЯ УКРАЇНИ ТА ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ РЕГІОНУ

О. О. Рєпкін¹

*Енергетична асоціація «Українська воднева рада»,
вул. Лаврська, 20, м. Київ, 01015, Україна,
тел.: (096) 333-34-44, e-mail: riepkin@hydrogen.ua*

У роботі обґрунтовано концепцію формування зелених транспортно-енергетичних коридорів у Чорноморському регіоні як інструменту післявоєнного відновлення України, декарбонізації морської логістики та інтеграції до європейського водневого ринку.

Ключові слова: Чорноморський регіон; зелені коридори; декарбонізація; відновлювана енергетика; зелений водень; е-метанол; е-аміак; морська логістика; енергетична безпека.

FORMATION OF GREEN CORRIDORS IN THE BLACK SEA AS A TOOL FOR THE REGENERATION OF UKRAINE AND DECARBONIZATION OF THE REGION

O. O. Riepin¹

*Energy Association "Ukrainian Hydrogen Council",
20 Lavrska str., Kyiv, Ukraine, 01015
phone: (096) 333-34-44, e-mail: riepkin@hydrogen.ua*

The paper substantiates the concept of establishing green transport and energy corridors in the Black Sea region as a tool for Ukraine's post-war recovery, decarbonization of maritime logistics, and integration into the European hydrogen market.

Key words: Black Sea region; green corridors; decarbonization; renewable energy; green hydrogen; e-methanol; e-ammonia; maritime logistics; energy security.

ORCID: ¹0000-0002-3448-6729.

Стратегічний розвиток Чорноморського регіону в сучасних геополітичних умовах потребує нових інтегрованих підходів, що поєднують економічне відновлення, енергетичну безпеку та кліматичну трансформацію. Запропонована концепція формування «зелених коридорів» у Чорному морі ґрунтується на системному баченні регіону як простору для прискореної декарбонізації морської логістики, створення нових виробничих кластерів відновлюваної енергетики та інтеграції України до європейських енергетичних і транспортних ринків.

Відповідно до Європейської зеленої угоди, Європейський Союз ставить за мету досягнення кліматичної нейтральності до 2050 року, що передбачає «глибоку трансформацію енергетичної, транспортної та промислової систем» [1]. У сфері морського транспорту стратегічні орієнтири конкретизовані в пакеті «Fit for 55» та ініціативі FuelEU Maritime, які передбачають поступове зниження вуглецевої інтенсивності морських перевезень і стимулювання використання відновлюваних та низьковуглецевих палив. Таким чином, формування зелених коридорів у Чорному морі відповідає загальноєвропейському курсу на декарбонізацію транспортної галузі.

Згідно із водневою стратегією ЄС, водень визначено як «ключовий елемент для інтеграції енергетичних систем і декарбонізації секторів, які складно електрифікувати» [2]. У документі наголошується, що розвиток регіональних водневих екосистем та транскордонної інфраструктури є необхідною умовою формування європейського ринку відновлюваного водню. Запропонована модель зелених коридорів у Чорноморському регіоні безпосередньо відповідає цим положенням, адже передбачає інтеграцію виробництва зеленого водню, синтезу його похідних (е-метанолу, е-аміаку), портової інфраструктури та кінцевих споживачів у єдину екосистему.

Ключова ідея концепції полягає у створенні мережі 2-4 зелених транспортно-енергетичних коридорів у Чорному та Егейському морях із перспективою розширення до басейну Дунаю. Коридори передбачають використання альтернативних низьковуглецевих і безвуглецевих палив для морських перевезень, портової інфраструктури та

суміжних секторів. Таким чином формується комплексна модель, що поєднує виробництво відновлюваної електроенергії, генерацію «зеленого» водню, синтез похідних палив (зокрема е-метанолу та е-аміаку), модернізацію портів і залучення кінцевих споживачів у секторах, які складно декарбонізуються.

Наукова новизна підходу полягає у застосуванні паливно-агностичної методології на етапі попереднього техніко-економічного дослідження. Замість фокусування на одному типі альтернативного палива здійснюється комплексна оцінка різних варіантів (зокрема е-метанолу та е-аміаку) з урахуванням вартості виробництва, логістичних ланцюгів, інфраструктурних вимог і потенціалу масштабування. Такий підхід відповідає сучасним рекомендаціям Міжнародної морської організації (ІМО), яка у своїй Стратегії зі скорочення викидів парникових газів від судноплавства наголошує на необхідності технологічної нейтральності та підтримки інноваційних рішень для досягнення кліматичних цілей [3].

Концептуальна модель структурована у три фази. Перша фаза охоплює формування локального зеленого коридору між портами України, Болгарії, Румунії та Греції. Друга фаза передбачає розширення ініціативи із залученням Туреччини та Грузії. Третя фаза стосується оцінки можливості створення зеленого коридору вздовж річки Дунай. На етапі попереднього дослідження основна увага приділяється першій фазі, що дозволяє зосередити ресурси на формуванні пілотного кластеру з високим ступенем готовності до масштабування.

Особливістю концепції є поєднання розвитку виробничих потужностей відновлюваної енергетики з експортно-логістичною інфраструктурою. Передбачається використання потенціалу сонячної та вітрової генерації південних регіонів України для виробництва водню методом електролізу з можливістю масштабування потужностей до гігаватного рівня. На пілотному етапі розглядається конфігурація електролізу 100 МВт із перспективою збільшення до кількох гігават, у поєднанні із сонячними та вітровими електростанціями. Це створює основу для формування регіонального хабу з виробництва та експорту зелених палив.

Отримані результати попереднього аналізу свідчать про потенційну економічну доцільність створення зелених коридорів за умови доступу до низьковартісної відновлюваної електроенергії та синхронізації інфраструктурних інвестицій у портах і флоті.

Методологія дослідження включає дві підфази попереднього техніко-економічного обґрунтування: етап визначення параметрів та розширений аналітичний етап. У межах цих підфаз здійснюється картування потенційних маршрутів, оцінка виробничих потужностей, аналіз регуляторних бар'єрів, ризик-менеджмент та формування фінансової моделі. Важливою складовою є інтеграція виробничих об'єктів із зеленими коридорами, що потребує первинного бюджету на дослідження та підготовку інвестиційної документації.

Серед ключових ризиків визначено фінансові та геополітичні фактори, що можуть впливати на строки реалізації та вартість капіталу. Водночас саме стратегія створення міжнародного консорціуму та багатосторонньої співпраці в Чорноморському та Егейському басейнах розглядається як механізм зниження цих ризиків через розподіл відповідальності, доступ до фінансових інструментів та узгодження нормативної бази.

Актуальність запропонованої стратегії визначається трьома взаємопов'язаними чинниками: необхідністю післявоєнного відновлення України, потребою ЄС у диверсифікації джерел енергії та глобальним курсом на декарбонізацію морського транспорту. Формування зелених коридорів дозволяє інтегрувати ці цілі в єдину модель розвитку, де енергетична трансформація стає драйвером економічного зростання, технологічних інновацій і регіональної безпеки.

Таким чином, концепція зелених коридорів у Чорному морі пропонує нову парадигму стратегічного розвитку регіону – від фрагментарних ініціатив до системного, науково обґрунтованого та поетапного формування інтегрованої енергетично-транспортної екосистеми. Її реалізація створює передумови для позиціонування України як ключового елементу європейської водневої та відновлюваної архітектури, а Чорноморського регіону – як платформи для впровадження інноваційних рішень у сфері сталого розвитку.

ПОСИЛАННЯ

1. European Commission. The European Green Deal. Brussels, 2019. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52019DC0640>
2. European Commission. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe. Brussels, 2020. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:52020DC0301>
3. International Maritime Organization (IMO). 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. London, 2023. URL: <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/annex/MEPC%2080/Annex%2015.pdf>

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СТРУМОВОГО ЗАХИСТУ В РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ З РОЗОСЕРЕДЖЕНОЮ ГЕНЕРАЦІЄЮ

О. С. Яндульський, Ю. В. Хлистов

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр-т Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна
тел.: (050) 388-29-20, e-mail: khlystov.yu.v.-ek41f@edu.kpi.ua

У роботі досліджується вплив потужності та місця підключення джерел розосередженої генерації на рівень струмів короткого замикання та ефективність максимального струмового захисту. Показано необхідність переходу до адаптивних схем захисту.

Ключові слова: максимальний струмовий захист, чутливість релейного захисту, розподільні мережі, розосереджена генерація.

Інтеграція джерел розосередженої генерації (РГ) в існуючі електричні мережі середньої та низької напруги є однією з ключових тенденцій розвитку сучасної електроенергетики. Впровадження РГ призводить до суттєвої зміни параметрів енергосистеми: значення струму пошкодження та його напрямку змінюються при підключенні додаткових генеруючих потужностей. Традиційно в розподільних електричних мережах (РЕМ) в якості основних та резервних використовуються ступеневі струмові захисти. Проте, зміна рівнів струмів короткого замикання (СКЗ) безпосередньо впливає на розрахункові уставки максимального струмового захисту (МСЗ), його ефективність та вимагає нових підходів до реалізації.

Метою даного дослідження є комплексний аналіз впливу місця підключення та потужності РГ на частку струму від центральної енергосистеми та коефіцієнт чутливості МСЗ для зон основного та дальнього резервування.

Для аналізу впливу точки підключення РГ на величину струму короткого замикання було обрано базову лінію, до якої на певній відстані підключалося джерело генерації, а на кінцевій підстанції імітувалося трифазне коротке замикання (рисунок 1).

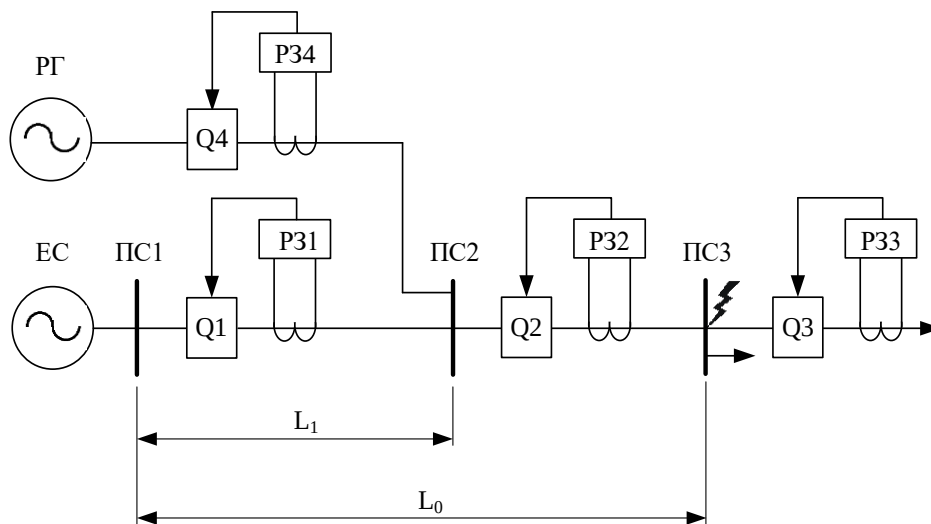


Рисунок 1 – Досліджуваний фрагмент РЕМ

Проведені розрахунки доводять, що найбільше зниження чутливості резервного струмового захисту відбувається у випадках, коли точка підключення РГ розташована посередині основної лінії живлення навантаження. У такій конфігурації підживлення струму короткого замикання від енергосистеми стає мінімальним, що призводить до критичного зменшення чутливості резервного захисту (рисунок 2).

Крім розташування, визначальним фактором є потужність підключеної РГ. Дослідження виявило, що залежність загального струму короткого замикання від потужності РГ має гіперболічний характер, тобто цей вплив є нелінійним.

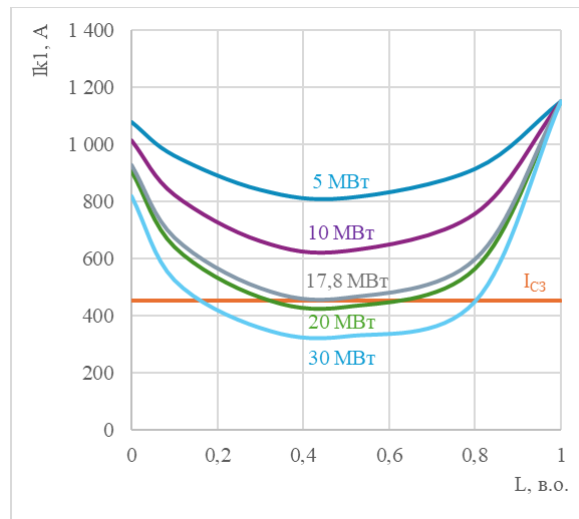


Рисунок 2 – Графік залежності струму к.з. від точки підключення та потужності РГ

Найбільший вплив на зміну рівня СКЗ спостерігається у діапазоні потужностей до 20 МВт. Згідно з нормами ПУЕ, мінімально допустиме значення коефіцієнта чутливості для резервного захисту лінії становить 1,2. Кількісні оцінки продемонстрували, що цей коефіцієнт критично зменшується зі зростанням потужності РГ та збільшенням довжини базової лінії (рисунок 3).

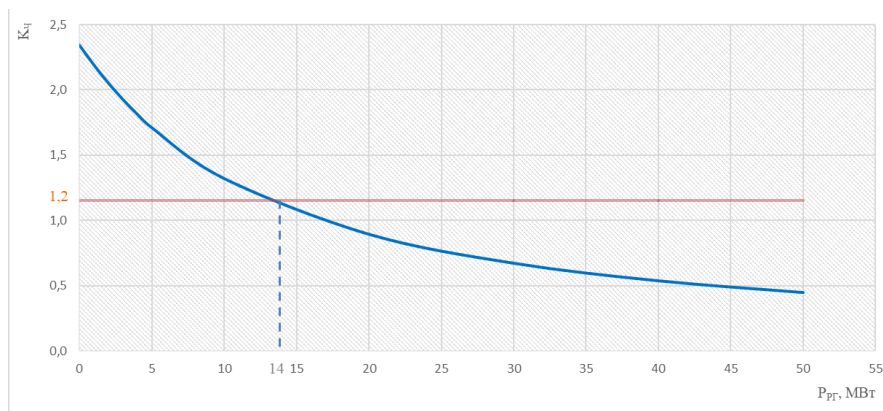


Рисунок 3 – Графік залежності коефіцієнта чутливості РЗ від потужності РГ

Наприклад, для базової лінії довжиною 10 км нормативному значенню чутливості відповідає потужність РГ на рівні 14 МВт. Збільшення потужності генерації понад 14 МВт веде до критичного зниження коефіцієнта (нижче норми), що в реальних умовах означатиме відмову в спрацюванні резервного захисту.

Водночас, оцінка чутливості основного струмового захисту виявила протилежну тенденцію. Його коефіцієнт чутливості зростає зі збільшенням потужності РГ та зменшенням довжини базової лінії. Отримані значення для ліній довжиною до 10 км стабільно перевищують норму ПУЕ (1,5), що свідчить про надійне спрацювання основного захисту в таких конфігураціях.

Проведені дослідження підтверджують, що в умовах активної інтеграції ВДЕ традиційний максимальний струмовий захист не здатний гарантовано забезпечувати функцію дальнього резервування [1]. Оскільки електростанції на основі відновлюваних джерел мають змінні параметри, традиційний підхід із застосуванням фіксованих уставок стає малоефективним. Забезпечення надійного функціонування розподільних мереж України вимагає переходу до адаптивних схем релейного захисту, які передбачають безперервний моніторинг елементів мережі та оперативне коригування налаштувань захисту відповідно до поточних режимів генерації.

ПОСИЛАННЯ

1. Yandulskiy O., Khlystov Y. Impact of distributed generation on the functioning of line current protection. Power Engineering, Economics, Technique, Ecology. 2025. Vol. 81, no. 3, P. 53-57. URL: <https://doi.org/10.20535/1813-5420.3.2025.339754>

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДИФЕРЕНЦІЙНОГО ЗАХИСТУ ГЕНЕРАТОРА В РЕЖИМАХ З НАСИЧЕННЯМ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

В. В. Заколюдажний¹, А. О. Тимохіна², Б. В. Кобзар³

^{1,2,3}Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського,
Берестейський проспект 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (068) 119-78-36, e-mail: a.planida@ukr.net

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі аварійних режимів роботи генераторів та аналізу особливостей захистів генераторів.

Ключові слова: синхронний генератор, електроенергетична система, коротке замикання, диференційний захист, насичення трансформатора струму, захист генератора.

INCREASING THE RELIABILITY OF GENERATOR DIFFERENTIAL PROTECTION UNDER CURRENT TRANSFORMER SATURATION CONDITIONS

V. V. Zakolodyazhnyy¹, A. O. Tymokhina², B. V. Kobzar³

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
Beresteyskyi Avenue 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
phone: (068) 119-78-36, e-mail: a.planida@ukr.net

When solving the tasks set in the work, general methods of theoretical analysis of the problem were used based on emergency modes of generator operation and peculiarities of generator protection.

Key words: synchronous generators, power systems, short circuit, differential protection, saturation.

ORCID: ¹0000-0001-8277-4170, ²0000-0001-5892-0326, ³0009-0004-2625-7821

Синхронні генератори є одними з ключових елементів електроенергетичних систем, оскільки саме вони забезпечують перетворення механічної енергії турбіни в електричну, і на їхню долю припадає, поки що, найбільша частка виробленої електроенергії. Надійність та стабільність їх роботи безпосередньо впливають на стійкість функціонування енергосистеми та, відповідно – безперервність електропостачання споживачів. У процесі експлуатації генератори можуть працювати в різних аварійних режимах, що супроводжуються електричними, тепловими та механічними перевантаженнями. Найбільш поширеними видами пошкоджень є: міжфазні короткі замикання в обмотці статора; однофазні замикання на землю; виткові замикання обмоток; замикання між витками однієї фази; замикання на землю в колі ротора; перевантаження обмотки статора; струми, викликані зовнішніми короткими замиканнями. Такі режими можуть призводити до значних термічних та електродинамічних пошкоджень елементів генератора. Тому, для їх своєчасного виявлення та запобігання розширенню аварії застосовують комплекс різних видів релейного захисту, які повинні забезпечувати необхідну чутливість, швидкодію, селективність та надійність.

Одним із головних, видів захисту генератора є диференційний захист статора, який призначений для виявлення внутрішніх коротких замикань у обмотках. Його принцип роботи базується на порівнянні струмів, що протікають у паралельних вітках обмотки статора (для поперечного дифзахисту), та порівняння струмів початку та кінця обмоток для поздовжнього дифзахисту. У нормальному режимі, або при зовнішніх коротких замиканнях – ці струми мають бути практично рівні (за виключенням невеликого струму небалансу), тому диференційний струм близький до нуля. У випадку внутрішнього пошкодження виникає різниця струмів, яка перевищує уставку спрацювання, і викликає спрацювання захисту та відключення генератора.

Одною з основних проблем цих захистів, крім збільшення струму небалансу при зовнішніх КЗ через неоднаковість характеристик трансформаторів струму (ТС), є вплив насичення ТС, яке виникає через появу аперіодичної

складової (актуально і для великих машин, і малих), що може призводити до появи помилково великого диференційного струму і, як наслідок, до хибних спрацювань захисту.

Метою роботи є розробка та дослідження вдосконаленого алгоритму диференційного захисту статора, який забезпечує підвищення надійності роботи захисту в умовах сильного насичення трансформаторів струму, особливо в умовах значної аперіодичної складової струму короткого замикання.

Сучасні системи релейного захисту, як правило, реалізуються на базі мікропроцесорних пристроїв, які забезпечують підвищену точність вимірювання, можливість самодіагностики, реєстрацію аварійних подій та можливість інтеграції захисту у автоматизовану систему моніторингу та керування технологічним процесом (АСКТП).

Новий запропонований варіант реалізації диференційного захисту статора враховує явище насичення трансформаторів струму, яке буває особливо значимим при наявності аперіодичної складової у струмі короткого замикання. Також, варто зазначити, що запропонований алгоритм забезпечує достатню швидкість – час спрацювання близько половини періоду частоти мережі.

Алгоритм базується на використанні трьох основних функціональних елементів: диференційного елемента; детектора насичення трансформаторів струму; блоків виявлення напрямку струму. Ці елементи об'єднані за допомогою розробленої спеціальної логіки, що дозволяє забезпечити високу швидкість та надійність роботи захисту. Робочий струм визначається за принципом диференційного захисту, а гальмівний струм обирається як максимальне значення струмів, виміряних з боку виводів та нейтралі генератора.

Такий підхід дозволяє підвищити стійкість захисту до насичення трансформаторів струму під час зовнішніх коротких замикань. Для зменшення впливу перехідних процесів використовується додаткове пост-фільтрування вихідного сигналу.

Алгоритм передбачає використання спеціального детектора насичення трансформаторів струму. У ньому реалізовано три механізми:

- виявлення насичення, яке спричинене швидкою зміною струму (di/dt);
- виявлення насичення, викликаного значними аперіодичними (інфранизькочастотними) складовими струму;
- використання спеціальної схеми пам'яті, яка зберігає інформацію про стан насичення протягом певного часу.

Для виявлення насичення аперіодичною складовою визначаються відповідні складові струмів у колах нейтралі та фазних виводів генератора. Якщо величина такої складової перевищує задану частину змінної складової струму, фіксується наявність насичення трансформатора струму.

Висновки

У роботі проведено аналіз основних аварійних режимів роботи синхронних генераторів та розглянуто загальні принципи побудови їх релейного захисту. Особливу увагу приділено диференційному захисту статора, який є основним засобом захисту генератора від внутрішніх коротких замикань.

Запропонований алгоритм диференційного захисту дозволяє ефективно враховувати вплив насичення трансформаторів струму, особливо при наявності значної аперіодичної складової, та забезпечує вищу надійність роботи захисту та, одночасно – високу швидкість. Результати досліджень підтверджують перспективність використання такого підходу в сучасних мікропроцесорних пристроях релейного захисту генераторів.

ПОСИЛАННЯ

1. Релейний захист генераторів. URL: <https://studfile.net/preview/5679667/page:14/> (дата звернення 03.02.2026)
2. Захист від замикань на землю в обмотці статора генератора. URL: <https://studfile.net/preview/11823876/page:19/> (дата звернення 01.02.2025)
3. Generator Protection Fundamentals. Mike Kockott . URL: <https://library.e.abb.com/public/1db15341cf652f2985257be1004a2bc0/Generator%20Protection%20Fundamentals.pdf> (дата звернення 15.02.2026)
4. Поперечний диференційний захист генератора. URL: <https://studfile.net/preview/11823876/page:18/> (дата звернення 21.02.2026)
5. Релейний захист гідрогенераторів 100 МВТ О. Л. Мельник О. Є. Рубаненко Матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів Вінницького національного технічного університету (НТКП ВНТУ–2018) 14-23 березня 2018 року Збірник доповідей. URL:

<https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2025/paper/viewFile/22877/18874> (дата звернення 10.03.2026 р.)

6. О.С. Яндульський, О.О. Дмитренко Релейний захист. Цифрові пристрої релейного захисту, автоматики та управління електроенергетичних систем. НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 1,36 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2016. – 103 с. – Назва з екрана. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/9fe8b977-13b6-4c3a-82bf-dcad5db59a34/content> (дата звернення 15.02.2026)
7. Kasztenny, Bogdan & Finney, Dale. (2005). Generator Protection and CT-Saturation Problems and Solutions. Industry Applications, IEEE Transactions on. 41. 1452 - 1457. DOI: 10.1109/TIA.2005.858298. https://www.researchgate.net/publication/3172066_Generator_Protection_and_CT-Saturation_Problems_and_Solutions (дата звернення 10.03.2026)

УДК 621.311.25

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ УМОВ ЖИВЛЕННЯ ВІД ДЖЕРЕЛ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГІЇ

О. М. Попович¹, І. В. Головань²

^{1,2}Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143,

^{1,2}Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги 56, м. Київ, 03057, Україна, e-mail:
popovich1955@ukr.net

*Робота присвячена обґрунтуванню доцільності включення робочої частоти живлення електро-
механічного обладнання систем відновлюваної енергетики до системи варіюємих параметрів для про-
ведення проектного синтезу.*

Ключові слова: електромеханічні системи, занурений свердловинний насос, комплексні математи-
чні моделі і критерії.

OPTIMIZATION OF ELECTROMECHANICAL SYSTEMS FOR OPERATION UNDER POWER SUPPLY FROM RENEWABLE ENERGY SOURCES.

O. Popovych¹, I. Golovan²

^{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, Metrolozhichna street., 50 Kyiv, Ukraine, 03143

*This work is devoted to substantiating the feasibility of including the operating supply frequency of electro-
mechanical equipment in renewable energy systems in the set of variable parameters used for performing
design synthesis.*

Keywords: electromechanical systems, hydraulic power plants, complex mathematical models and criteria.

ORCID: ¹0000-0002-9238-5782; ²0000-0002-5250-6981.

Ефективність систем відновлюваної енергетики (ВЕ) доцільно оцінювати за комплексними критеріями [1], як спів-
відношення виробленого продукту і спожитого ресурсу. При цьому критерій енергетичної ефективності слід за-
стосовувати у тісному зв'язку з ресурсною ефективністю. Наприклад, порівняння фотоелектричних модулів у ба-
гатьох випадках доцільно здійснювати не за критерієм їх ККД, а за співвідношенням енергетичного виходу до
вартості обладнання, або за терміном окупності. Застосування такого підходу для визначення оптимальних кон-
фігурацій електромеханічних систем (ЕМС) ВЕ повинно супроводжуватись включенням до варіюємих параметрів
робочої частоти струмів електричної мережі, оскільки її збільшення сприяє покращенню масо-габаритних показ-
ників електромеханічних перетворювачів і інших елементів системи. При цьому, збільшення частоти не супрово-
джується суттєвим збільшенням вартості обладнання джерела живлення: силова частина інвертора залишається
без змін. Проведення проектного синтезу ЕМС ВЕ із розширенням області варіюємих параметрів потребує засто-
сування вдосконалених засобів дослідження і проектування електромеханічних перетворювачів, зокрема асинх-
ронних. У зв'язку з цим актуальною є задача розробки підходів до визначення оптимальних параметрів таких
систем з урахуванням зміни частоти живлення.

Доцільність підвищення частоти ЕМС зануреного свердловинного насоса досліджена у роботі [2]. Де показано,
що подвоєння частоти живлення зануреного асинхронного двигуна насоса забезпечує (порівняно із базовим се-
рійним варіантом) покращення показників ефективності: збільшення продуктивності у 2,2 рази; зменшення тер-
міну окупності свердловини у 1,9 рази і кількість робочих коліс насоса у 3 рази; збільшення ККД асинхронного
двигуна на 4 %, незважаючи на збільшення гідравлічних втрат у свердловині за незмінного її діаметру.

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/techne2022.02.052
2. Головань І.В., Попович О.М., Шевчук С.П. Ефективність застосування асинхронного двигуна з суцільним осер-
дям зануреного свердловинного насоса за збільшеної частоти живлення. – Технічна електродинаміка. – 2026.
– № 1. – С. 39-49. DOI:10.15407/techne2026.01.039.

КОРОТКОСТРОКОВЕ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОПИТУ НА НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ – СОНЯЧНА ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ, НАКОПИЧУВАЧ ЕНЕРГІЇ

В. О. Дерій¹, А. О. Запорожець², Т. П. Нечаєва³, Я. В. Гавриленко⁴

*Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (066) 790-87-20, e-mail: yasx80@gmail.com*

У роботі запропоновано методику та розрахункову модель визначення оптимального рівня прогнозованої потужності та раціональних обсягів акумуляції енергії для енергетичного комплексу, що включає сонячну електростанцію та установку зберігання електричної енергії і функціонує паралельно з електричною мережею в умовах короткострокового прогнозування (доба наперед і більше). Запропонований підхід забезпечує можливість мінімізації витрат енергетичних компаній на короткострокову оренду частини ємності установки зберігання електроенергії у разі відсутності власної, а при її наявності, також створюються передумови для підвищення економічної ефективності шляхом передачі в оренду надлишкової (невикористаної) частини її ємності з отриманням додаткового доходу.

Ключові слова: сонячна електростанція, установка накопичення енергії, потреби в акумуляції, розрахункові коефіцієнти, ймовірність виникнення відхилення.

SHORT-TERM FORECASTING OF ENERGY STORAGE DEMAND IN A SOLAR POWER PLANT– ENERGY STORAGE SYSTEM INTEGRATED ENERGY COMPLEX

V. O. Derii¹, A. O. Zaporozhets², T. P. Nechaieva³, Y. V. Havrylenko⁴

*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 proposes a methodology and a computational model to determine the optimal level of forecasted power and the rational energy storage capacity requirements for an energy complex comprising a solar power plant and an energy storage system operating in parallel with the power grid under short-term forecasting conditions (day-ahead and longer horizons). The proposed approach enables the minimisation of energy companies' costs associated with the short-term leasing of a portion of energy storage capacity in the absence of their own storage system. Owning an energy storage system also creates conditions to improve economic efficiency by leasing unused (excess) storage capacity and generating additional revenue.

Keywords: solar power plant, battery energy storage system, energy storage demand, optimisation coefficients, deviation probability.

ORCID: ¹0000-0002-5689-4897; ²0000-0002-0704-4116; ³0000-0001-9154-4545; ⁴0000-0003-2382-5411;

Глобальна трансформація енергетичного сектору, зумовлена необхідністю протидії кліматичним змінам та скорочення викидів парникових газів, насамперед CO₂, обумовлює поступовий перехід від традиційних викопних джерел енергії до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [1]. Динамічне зростання встановлених потужностей сонячної та вітрової генерації свідчить про їхню здатність формувати основу майбутньої низьковуглецевої енергосистеми та відігравати ключову роль у забезпеченні сталого енергетичного розвитку [2,3].

У світовій науковій практиці активно досліджуються енергетичні комплекси на основі сонячних електростанцій та установок зберігання енергії, у межах яких аналізуються режими їхньої спільної роботи, ефективність зарядно-розрядних процесів, техніко-економічна доцільність застосування різних типів систем накопичення, а також методи оптимізації потреб енергетичного комплексу в ємності та потужності установок зберігання енергії.

Метою дослідження є розроблення математичної розрахункової моделі для оперативного прогнозування необхідних параметрів установки зберігання енергії, зокрема її ємності, потужності системи перетворення енергії та

обсягу електроенергії, який має бути забезпечений на початок роботи енергетичного комплексу. Отримані результати можуть бути використані для мінімізації витрат енергетичних компаній на короткострокову оренду частини потужності установки зберігання енергії у разі відсутності власної системи накопичення, а також для підвищення економічної ефективності при наявності власної УЗЕ шляхом передачі в оренду її невикористаної частини та отримання додаткового доходу.

Через відсутність інформації щодо виробництва електроенергії окремими СЕС, було зроблено припущення, що всі СЕС ОЕС України – це одна велика електростанція. Що дало можливість використовувати для досліджень доступні масиви даних щодо погодинної потужності сонячних електростанцій ОЕС України а 2019 р. Енергетичний комплекс (ЕК) складається із СЕС, установки зберігання енергії (УЗЕ) та мережі і працює при постійному рівні потужності для покриття базового навантаження. ЕК розпочинає роботу на початку ранкового зростання навантаження, при цьому в нічний період здійснюється попереднє заряджання УЗЕ від мережі до рівня, достатнього для забезпечення заданої потужності комплексу спільно із СЕС до моменту досягнення нею необхідного рівня генерації. У денний період надлишкова електроенергія СЕС акумулюється в УЗЕ та використовується для підтримки встановленого рівня потужності за умов зниження сонячної активності та у вечірні години.

Дослідження показало, що при підвищенні рівня вихідної потужності ЕК потреби в акумуляції надлишкової електроенергії в світлі години доби зменшуються, але при цьому, зростають потреби в кількості накопиченої енергії в нічний період, перед початком роботи і навпаки. Це говорить про те, що існує точка перетину графіків функціональних залежностей потреб для накопиченої енергії від мережі перед початком роботи комплексу та кількості потреб в акумуляції надлишкової електроенергії від СЕС в світлий період доби. Вихідна потужність ЕК в точці перетину цих графіків і є оптимальною. Моделювання показало, що при оптимальній потужності кількість електроенергії, яку потрібно накопичити в нічний період в УЗЕ від мережі, дорівнює кількості енергії, яку необхідно акумулювати в денний період, при цьому забезпечуються мінімальні потреби в ємності УЗЕ. За допомогою надбудови Solver програмного середовища Excel проведено розрахунок оптимального рівня прогнозованої потужності для кожного дня у 2019 р. На основі проведених статистичних досліджень та аналізу отриманих результатів визначені середньомісячні розрахункові коефіцієнти для оперативного прогнозування оптимальної потужності, ємності та потужності УЗЕ та кількості енергії, яка потрібна на початок роботи ЕК.

Оптимальне значення потужності ЕК визначається як добуток розрахункового коефіцієнта та прогнозованої середньої потужності СЕС в j -ту добу m -того місяця. А потреби в ємності (енергії на початок роботи ЕК) та потужності УЗЕ в j -ту добу m -того місяця як добуток відповідного розрахункового коефіцієнта та оптимальної потужності.

ВИСНОВКИ

1. Запропонована методика та розрахункова модель забезпечують визначення оптимального рівня прогнозованої потужності та раціональних потреб в акумуляції енергетичного комплексу СЕС–УЗЕ при короткостроковому прогнозуванні, що сприяє мінімізації витрат на оренду або підвищенню економічної ефективності використання власної системи зберігання енергії.
2. Апробація методики проводилась на масиві даних погодинної потужності сонячних електростанцій ОЕС України за 2018 р. Статистичний аналіз отриманих результатів показав, що ймовірність появи максимальних відхилень для оптимальної потужності енергетичного комплексу – 5,4%; потужності та ємності установки зберігання електроенергії – 13% та 18% відповідно, що не перевищує 0,05 протягом року
3. Розроблена методика має універсальний характер і може бути адаптована для окремих СЕС у різних кліматичних умовах за умови коригування розрахункових коефіцієнтів при збереженні загальної логіки її застосування.

ПОСИЛАННЯ

1. Parisa Rahdan, Elisabeth Zeyen, Cristobal Gallego-Castillo, Marta Victoria, Distributed photovoltaics provides key benefits for a highly renewable European energy system, Applied Energy, Volume 360, 2024, 122721, ISSN 0306-2619, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.122721>.
2. Our World in Data. Installed capacity for different renewable technologies. <https://ourworldindata.org/grapher/installed-global-renewable-energy-capacity-by-technology>. (accessed March 1. 2026).
3. IEA: до 2025 року понад третина електроенергії у світі вироблятиметься з ВДЕ : новина / Укргідроенерго, 20.03.2023. URL: https://uhe.gov.ua/media_tsentr/novyny/iea-do-2025-roku-ponad-tretyna-elektroenerhiyi-u-sviti-vyroblyatymetsya-z-vde (дата звернення: 01.03.2026).

УДК 621.311.1

ВИКОРИСТАННЯ АЛГОРИТМІВ РІШЕННЯ ТРАНСПОРТНОЇ ЗАДАЧІ ІЗ ПРОМІЖНИМИ ПЕРЕВЕЗЕННЯМИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ РОЗВИТКУ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ЕНЕРГОСИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

В.А. Баженов¹

Національний технічний університет України
„Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”,
Берестейський пр. 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: +38(050)384-60-10, e-mail: v_bazhenov@ukr.net

В роботі розглянуті питання оптимізації розвитку електричних мереж великих систем енергетики. Для оптимізації рекомендується використовувати алгоритми рішення транспортної задачі з проміжними перевезеннями, більш прості і ефективні ніж стандартний симплекс-метод.

Ключові слова: електрична мережа, енергосистема, оптимізація розвитку, елементи мережі.

USE OF ALGORITHMS FOR SOLVING THE TRANSPORT PROBLEM WITH INTERMEDIATE TRANSPORTATIONS FOR OPTIMIZATION OF THE DEVELOPMENT OF ELECTRICITY NETWORKS OF ENERGY SYSTEMS WITH RENEWABLE SOURCES

V. A. Bazhenov¹

National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteysky Avenue 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
tel.: +38(050)384-60-10, e-mail: v_bazhenov@ukr.net

The paper considers the issues of optimizing the development of electrical networks of large energy systems. For optimization, it is recommended to use algorithms for solving the transport problem with intermediate transportation, which are simpler and more effective than the standard simplex method.

Keywords: electric network, power system, development optimization, network elements.

ORCID¹: 0000-0003-1622-5207

Один з можливих шляхів вирішення загальної задачі оптимізації розвитку електричних мереж енергосистем - її спрощення і приведення до відомих задач обчислювальної математики, для вирішення яких можуть бути застосовані стандартні математичні методи й алгоритми. При використанні методів лінійного програмування задача оптимізації розвитку електричних мереж повинна бути сформульована як задача відшукування мінімуму функції дисконтованих витрат на транспорт енергії від електростанцій до споживачів при наявності обмежень по балансу потужності у вузлах.

При використанні методів лінійного програмування негладкі безперервні функції оптимальних витрат у лінії і трансформаторні підстанції мережі повинні бути апроксимовані прямими лініями, що проходять через початок координат.

Розглянемо класичну постановку транспортної задачі. Нехай задані місця розташування електростанцій, кожна з яких генерує потужність a_i , де $i = 1, 2, \dots, I$. Крім того, задані навантажувальні пункти, потреба в потужності

яких становить b_j , де $j = 1, 2, \dots, J$. Передбачається, що розглянутий раніше алгоритм рішення транспортної задачі може бути розповсюджений на випадок, коли допускається транспорт енергії не тільки від джерел до споживачів, на й безпосередньо між споживачами й між джерелами

Транспортна задача являє собою задачу оптимізації функції IJ перемінних. В алгоритмах вирішення транспортної задачі, на відміну від розглянутої модифікації симплекс-методу базисними перемінними називаються залежні перемінні, кількість яких дорівнює $I + J$. Інші $IJ - I - J$ перемінні називаються позабазисними.

Розглянутий алгоритм рішення транспортної задачі може бути розповсюджений на випадок, коли допускається транспорт енергії не тільки від джерел до споживачів, на й безпосередньо між споживачами й між джерелами. Дана задача одержало назву транспортної задачі із проміжними перевезеннями й може бути сформульована як задача мінімізації функції

$$3 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^I C_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

де i, j - поточні індекси вузлів мережі. У цьому випадку джерела й споживачі мають загальну нумерацію $i, j = 1, 2, \dots, I$. Задачу вирішують при наявності обмежень по балансу потужності у джерелах

$$\sum_i x_{ji} - x_{jj} = a_j \quad (2)$$

та у навантажувальних пунктах

$$\sum_i x_{ij} - x_{jj} = b_j \quad (3)$$

де i - поточний індекс вузлів, безпосередньо пов'язаних з розглянутим j -м вузлом; x_{jj} - транзитна потужність. Коефіцієнти питомої вартості транспорту транзитної потужності виду C_{jj} ухвалюють рівними нулю.

Для джерел енергії транзитна потужність - це потужність, яка надходить у дане джерело від інших пунктів:

$x_{jj} = \sum_i x_{ij}$. Для навантажувальних пунктів транзитна потужність дорівнює сумі потужності, які з розглянутого

j -го пункту надходять до інших споживачів або джерел енергії: $x_{jj} = \sum_i x_{ji}$.

Для реалізації алгоритму вирішення задачі необхідно скласти транспортну матрицю, елементи якої являють собою потужності, що протікають по припустимих лініях зв'язку. Рядки транспортної матриці являють собою рівняння балансу потужності для електростанцій, а стовпці - рівняння балансу потужності для навантажувальних вузлів. Крім того, у клітках матриці записані питомі вартості передачі по припустимих зв'язках C_{ij} . Величини U_1, U_2 і V_1, V_2, V_3 одержали назву симплекс - множників.

Визначають клітку транспортної матриці з найменшим значенням питомої вартості транспорту енергії C_{ij} . Базисну перемінну x_{ij} , котра повинна бути записана в розглянуту клітку, знаходять з умови $x_{ij} = \min \{a_i, b_j\}$. Якщо $a_i < b_j$, замість значення a_i у відповідну клітку записують нуль, а b_j замінюють $b_j - a_i$. Крім того, в інші незаповнені клітки i -го рядка заносять нулі. Якщо $b_j < a_i$, у відповідну клітку матриці замість значення b_j записують нуль, замість a_i записують $a_i - b_j$, а інші незаповнені елементи j -го стовпця замінюють нулями. Далі знову вибирають незаповнену клітку з найменшим значенням C_{ij} , визначають базисну перемінну x_{ij} , знову порівнюють величини a_i й b_j і т.д. Процес закінчується тоді, коли будуть визначені значення x_{ij} для всіх кліток транспортної матриці.

У цьому випадку з числа негативних коефіцієнтів матриці вибирають коефіцієнт, що має найменше значення $\bar{C}_{mn}$. Відповідній перемінній привласнюють значення θ . Тоді для збереження балансу у відповідному рядку m і стовпці n які-небудь базисні перемінні змінюють на $-\theta$. Це у свою чергу викликає зміну інших базисних перемінних на $+\theta$.

Розглянутий алгоритм оптимізації розвитку електричних мереж великих систем енергетики реалізований у пакеті прикладних програм для персональних комп'ютерів. Розрахунки показали, що запропонований метод оптимізації відрізняється гарною збіжністю, досить стійкий до вибору початкових наближень.

ПОСИЛАННЯ

1. Баженов В.А. Моделирование электрической сети при оптимизации развития энергосистем / Техническая электродинамика. 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.: Наукова думка, 1992. – 216 с.

ANALYSIS OF THE PAYBACK PERIOD OF THE NETWORK ENERGY SAVING SYSTEM IN DIFFERENT SEGMENTS OF THE ELECTRICITY MARKET OF UKRAINE

John Smith¹, Ann Johnson²

*General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (066) 222-22-22, e-mail: p_petrenko@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: *autonomous installation, active condensation method, air humidity, obtaining water from air, "dew point" temperature.*

ORCID: ¹0000-0000-0000-0000; ²0000-0000-0000-0000.

Abstracts of conference reports should be written in English, one or two **FULL** pages in length and should be formatted according to the given sample. File format: *.doc, *.docx.

Page margins (A4): inner, top, bottom – 2 cm, outer – 1.7 cm. The title of theses is placed in the center of the page, in CAPITAL letters, font 12 pt, Calibri, bold. Between the name and the surnames of the authors there is an indent of one line. Abstracts are centered, font 12 pt, Calibri, bold italics. If there are several authors from different organizations, marks are made with digital indexes (1 2...) after the author's last name and before the name of the organization, respectively. Names of scientific institutions/organizations are indicated in full and centered, font 10 pt, Calibri, italics. Annotation and keywords are formatted with standard paragraph alignment on the left side, font 11 pt, Calibri, italics.

The text of theses is drawn up in 10 pt Calibri font with a single line spacing and is aligned across the page. No paragraph indents. Figures and formulas located within the given limits may be used in the text. All drawings and inscriptions on them must be clear and easy to read. References to the literature are drawn up in the format given below [1-3], and are placed at the end of abstracts, having previously made a gap in one line (10 pt font, Calibri with single line spacing).

Abstracts should be informative and give a complete picture of the nature of the obtained results, their scientific novelty and relevance.

This sample is designed in accordance with the above requirements and can be used as a template for writing theses of reports at the International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century".

REFERENCES

1. On amendments to some laws of Ukraine regarding the development of energy storage facilities: Law of Ukraine dated February 15, 2022 No. 2046-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#n8> (date of application: 07/15/2022).
2. On the electricity market: Law of Ukraine dated 04.13.2017 No. 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text> (date of application: 04.11.2021).
3. On the approval of changes to some resolutions of the NCRECP: Resolution of the National Commission for State Regulation in the Fields of Energy and Utilities dated November 29, 2022 No. 1592. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1592874-22#n2> (date of application: 03/04/2023).
4. On the approval of the Market Rules: Resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors of March 14, 2018 No. 307. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text> (date of application: 04.11.2021).
5. On the approval of the Rules of the "day-ahead" and intraday market: Resolution of the National Commission for State Regulation in the Energy and Utilities Sectors of March 14, 2018 No. 308. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0308874-18#Text> (date of application: 09/03/2021).

УДК 621.311.25

ІНСТРУМЕНТИ СИСТЕМНОГО АНАЛІЗУ ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ГАЛУЗІ ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

С. В. Зайченко¹, А. Р. Трачук², А. Буріма³, А. Пачев⁴

Київський політехнічний інститут,
Навчально-науковий інститут енергоефективності,
Київ, Україна,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна
телефон: (063) 24-27-957, електронна пошта: atrachuk1990@gmail.com

У цьому дослідженні для дослідження систем відновлюваної енергетики було застосовано загальні методи системного аналізу. Підхід включав вивчення експлуатаційних характеристик, надійності та економічної ефективності сонячних, вітрових, гідро- та біомасових установок за допомогою інструментів математичного моделювання, симуляції та оптимізації.

Ключові слова: системний аналіз, відновлювана енергетика, симуляційне моделювання, оптимізація, енергоефективність, інструменти підтримки прийняття рішень

SYSTEM ANALYSIS TOOLS AND THEIR USE IN RENEWABLE ENERGY APPLICATIONS

S. V. Zaichenko¹, A. R. Trachuk², A. Burima³, A. Pachev⁴

Kyiv Polytechnic Institute, Educational-Scientific Institute of Energy Efficiency, Kyiv, Ukraine,
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
phone: (063) 24-27-957, e-mail: atrachuk1990@gmail.com

In this study, general system analysis methods were applied to investigate renewable energy systems. The approach involved examining operational performance, reliability, and economic efficiency of solar, wind, hydro, and biomass installations using mathematical modeling, simulation, and optimization tools.

Keywords: system analysis, renewable energy, simulation modeling, optimization, energy efficiency, decision support tools

ORCID:² <https://orcid.org/0000-0001-8755-605X>

Through the construction of multiple and carefully designed modeling scenarios, the study provides an extensive exploration of the complex dynamics of energy production, storage, and distribution across a wide range of environmental, technical, and market conditions. Each scenario is designed not only to simulate routine operational patterns but also to examine potential system responses to unusual or extreme conditions, allowing for the detailed identification of critical performance indicators, sensitivity factors, and vulnerabilities that could significantly influence overall system efficiency. By thoroughly analyzing these factors, the methodology offers a structured and systematic approach for evaluating potential risks, optimizing resource allocation, and predicting system behavior over both short-term operational cycles and long-term strategic horizons. This approach supports comprehensive planning and enables stakeholders to make well-informed investment and operational decisions in renewable energy projects, ensuring that technical feasibility, financial viability, and sustainability objectives are simultaneously addressed and balanced.

The research further demonstrates the indispensable role of system analysis as a unifying framework that guides policy-making, operational management, and long-term infrastructure development in the renewable energy sector. The applied system analysis tools encompass advanced simulation software capable of capturing the complex interactions between multiple energy generation and storage technologies, as well as optimization algorithms designed to determine the most efficient configurations of technical assets under diverse operating conditions. Scenario-based modeling frameworks complement these tools by allowing energy planners, engineers, and decision-makers to test alternative strategies, evaluate their potential impacts, and identify the configurations that maximize performance, reduce costs, and minimize environmental risks. The combination of these tools enables the quantification of expected gains, forecasting of system behavior under fluctuating weather patterns, variable load demands, and regulatory

changes, as well as identification of optimal technical and economic solutions tailored to the specific requirements of local, regional, and national energy markets.

A particular focus of this study is placed on the Ukrainian energy market, where the integration of renewable energy sources encounters a series of technical, economic, and regulatory challenges. By applying rigorous system analysis methods, the study identifies the most promising pathways for enhancing energy efficiency, increasing reliability, and reducing environmental impact in real-world conditions. The insights derived from this approach can directly inform the design, implementation, and operational management of renewable energy projects, while also guiding policymakers in developing supportive regulations, incentives, and long-term energy strategies. Additionally, the study provides a foundation for investors and project developers to evaluate profitability, risk exposure, and potential returns on investment, thereby enhancing confidence and promoting sustainable growth in the renewable energy sector.

Moreover, the research highlights the broader significance of system analysis in supporting the transition toward a sustainable energy infrastructure. It demonstrates how a systematic and rigorous application of analytical tools enables the harmonization of economic objectives with environmental responsibility, long-term strategic planning, and resilience against market volatility and climatic uncertainty. By offering a comprehensive understanding of system behavior, revealing potential bottlenecks and inefficiencies, and assessing alternative strategies and scenarios, this study underscores the critical role of system analysis in fostering innovation, operational efficiency, and long-term sustainability in modern energy systems. Ultimately, it confirms that successful integration of renewable energy technologies in Ukraine and comparable markets requires not only technically sound and economically viable solutions but also a holistic, data-driven, and adaptive approach to planning, decision-making, and system optimization.

REFERENCES

1. A comparative analysis of renewable energy simulation tools: Performance simulation model vs. system optimization — Renewable and Sustainable Energy Reviews. DOI: 10.1016/j.rser.2017.05.153
2. A critical analysis on hybrid renewable energy modeling tools: An emerging opportunity to include social indicators to optimise systems in small communities — Renewable and Sustainable Energy Reviews. DOI: 10.1016/j.rser.2019.109691
3. Energy planning and modeling tools for sustainable development: A systematic literature review — Energy Reports. DOI: 10.1016/j.egy.2023.11.043
4. Selecting Tools for Renewable Energy Analysis in Developing Countries: An Expanded Review — Frontiers in Energy Research. DOI: 10.3389/fenrg.2017.00034
5. A review of modeling and simulation tools for microgrids based on solar photovoltaics — Frontiers in Energy Research. DOI: 10.3389/fenrg.2022.772561

РОЗРОБКА ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПІДЙОМНОГО МЕХАНІЗМУ ЛІФТА ДЛЯ ПРОГНОЗНОГО ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Є. О. Філатов¹, С. В. Зайченко¹

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (093) 513-70-08, e-mail: filatov.eugene@gmail.com*

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися методи теорії електропривода, математичного моделювання, цифрових двійників, комп'ютерної візуалізації.

Ключові слова: цифровий двійник, електропривод, підйомний механізм ліфта, деградаційні процеси, математичне моделювання, сенсорні дані.

DIGITAL TWIN OF ELEVATOR HOISTING MECHANISM ELECTRIC DRIVE FOR PREDICTIVE MAINTENANCE AND DEGRADATION EVALUATION

Y. O. Filatov¹, S. V. Zaichenko¹

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
37, Beresteyskyi ave, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (093) 513-70-08, e-mail: filatov.eugene@gmail.com*

When solving the tasks set in the work, methods of electric drive theory, mathematical modeling, digital twins, computer visualization were used.

Key words: digital twin, electric drive, elevator hoisting mechanism, degradation processes, mathematical modeling, sensor data.

ORCID: ¹0009-0000-6822-5888; ²0000-0002-8446-5408.

Електроприводи є базовими елементами технологічного обладнання металургійної, гірничодобувної, хімічної та енергетичної галузей, а ефективність їх функціонування безпосередньо визначає показники енергоефективності, надійності та безперервності виробничих процесів. Водночас традиційні системи керування електроприводами, включно з системами на основі частотних перетворювачів, орієнтовані переважно на реалізацію заданих законів керування і не забезпечують комплексного оцінювання технічного стану обладнання в режимі реального часу [1]. Відсутність інструментів прогнозування деградаційних процесів та аналітичної інтерпретації діагностичних даних призводить до збільшення кількості аварійних зупинок, зростання питомих енергетичних втрат і прискореного зношування електромеханічних систем.

Одним із перспективних напрямів розв'язання зазначених проблем є впровадження цифрових двійників електроприводів, що дозволяє реалізувати принципи прогнозного технічного обслуговування (Predictive Maintenance), за яких керувальні та експлуатаційні рішення приймаються на основі аналізу стану цифрової копії фізичного об'єкта, яка відтворює динаміку дефектів і відхилень параметрів від номінальних значень [2]. Цифровий двійник електропривода розглядається як багаторівнева інтегрована модель, що поєднує математичний опис електромагнітних, механічних і теплових процесів із потоками експериментальних даних, отриманих від сенсорів струму, напруги, температури та вібраційних прискорень [1]. Цифрові двійники надають як числову, так і візуальну інформацію, що значно розширює можливості аналізу складних технічних систем. Використання цифрових двійників сприяє виявленню прихованих закономірностей і взаємозв'язків, які складно ідентифікувати за умови застосування класичних підходів до аналізу та моніторингу.

Для підвищення точності оцінювання технічного стану також розробляються багаторівневі архітектури цифрових двійників, які об'єднують фізичні моделі, машинне навчання, аналіз великих даних і нечітку логіку. Такі підходи, представлені в дослідженні О. В. Цветкова [3], дозволяють покращувати прогноз залишкового ресурсу силового обладнання, у тому числі асинхронних електродвигунів, завдяки поєднанню physics-informed моделювання та глибоких нейромереж для адаптації до змінних режимів навантаження.

Аналіз сучасних публікацій [3–4] показує, що більшість реалізованих цифрових двійників електроприводів орієнтовані на стаціонарне промислове обладнання (насоси, вентилятори, компресори), тоді як для динамічних систем з періодичними навантаженнями, зокрема підйомних механізмів ліфтів, переважають спрощені моделі без

урахування нелінійностей канатної системи, вібраційних впливів та термічного старіння ізоляції. Відсутні комплексні рішення, які б поєднували реальний час виконання моделі з точним прогнозуванням зносу механічних елементів (зубчасті передачі, канати, підшипники).

Об'єктом дослідження є електромеханічні процеси функціонування та деградації в системі електропривода підйомного механізму ліфта. До таких процесів належать електромагнітні, механічні та теплові явища, що визначають динамічні режими роботи електродвигуна, передавальних механізмів і навантаження, а також їх зміну внаслідок зносу та старіння елементів системи.

Предметом дослідження є методи, моделі та алгоритми прогнозування технічного стану й оптимізації режимів роботи електропривода, реалізовані в структурі цифрового двійника електромеханічної системи. Предмет дослідження охоплює підходи до інтеграції математичних моделей електропривода з експериментальними даними сенсорних вимірювань, методи оцінювання деградаційних процесів, а також засоби використання результатів цифрового моделювання для підтримки прийняття рішень щодо керування та технічного обслуговування електропривода.

Основні завдання дослідження полягають в аналізі сучасного стану і тенденцій розвитку цифрових двійників електроприводів, зокрема підходів до моделювання, збору експериментальних даних і візуалізації параметрів електромеханічних систем; обґрунтуванні вибору структури та архітектури цифрового двійника електропривода, визначивши склад апаратних компонентів, програмних модулів і каналів інформаційної взаємодії між фізичним та віртуальним рівнями; розробці математичну модель електропривода, що описує основні електромагнітні та механічні процеси і придатна для використання в режимі реального часу; створенні системи збору та обробки експериментальних даних на основі сенсорів струму, напруги, швидкості та прискорення з метою синхронізації вимірювань із цифровою моделлю; розробці програмного забезпечення цифрового двійника, яке забезпечує інтеграцію математичної моделі з потоками експериментальних даних, їх збереження в базі даних і обробку в режимі реального часу; експериментальній перевірці працездатності розробленого прототипу цифрового двійника, оцінці його точності, стабільності і можливості масштабування для використання в системах моніторингу та прогнозного технічного обслуговування.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблений прототип цифрового двійника електропривода може бути використаний для: моніторингу режимів роботи електроприводів у промислових системах; підтримки процесів діагностики та прогнозного технічного обслуговування електромеханічного обладнання; навчальних і дослідницьких цілей під час моделювання та аналізу електроприводів; подальшого розвитку систем керування з елементами інтелектуального аналізу та візуалізації.

Наукова новизна полягає в розробці інтегрованої багаторівневої моделі цифрового двійника електропривода підйомного механізму ліфта, яка враховує одночасно електромагнітні, механічні, теплові та деградаційні процеси в реальному часі; розробці алгоритмів прогнозування залишкового ресурсу тягового електродвигуна та канатної системи з використанням гібридних моделей (фізична + data-driven).

В результаті проведеної роботи сформовано концептуальну модель цифрового двійника електропривода та визначено параметри, необхідні для його реалізації. Проведено аналіз та узагальнення підходів до побудови цифрових двійників електроприводів промислових об'єктів, обґрунтовано доцільність використання ARIMAX як базової для моделювання електромагнітних процесів. Проведено оцінку технічних можливостей апаратно-програмної реалізації. Результати підготовчого етапу створюють основу для подальшої експериментальної верифікації моделі та впровадження систем прогнозного технічного обслуговування (*Predictive Maintenance*) на базі цифрового двійника електропривода.

ПОСИЛАННЯ

1. Fuller A., Fan Z., Day C., Barclay P. Digital Twin: Enabling Technology, Challenges and Open Research. IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971
2. Grieves M. Digital Twin: Manufacturing Excellence through Virtual Factory Replication. CIMdata, 2015. 28 p.
3. Цветков О.В. (2025) Інтелектуальні методи прогнозування відмов силового електротехнічного обладнання на основі багаторівневих цифрових двійників. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля No 9(295) 2025 URL: <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2025-295-9-81-90>
4. Vladyslav Pliuhin, Vitalii Herasymenko, Oleh Kulaienko, Alina Trotsai, Gennadii Loktionov and Taras Sakhoshko. The State and Prospects of Technical Condition Diagnostics Methods for Electric Motors Considering the Digital Twin Concept. Lighting Engineering & Power Engineering 2025, Vol. 64, No. 2, 57–64 URL: <https://doi.org/10.33042/2079-424X.2025.64.2.02.11>.

УДК 621.311.25

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ОЦІНКИ РЕЖИМНОЇ НАДІЙНОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМ ПРИ КАСКАДНОМУ РОЗВИТКУ ВІДМОВ

I. В. Заклюка²

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
кафедра відновлюваних джерел енергії,
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (063)-412-2098, e-mail: ihorzakliuka1@gmail.com*

Проаналізовано причини виникнення і механізми ескалації найбільш відомих системних аварій і каскадних відмов, що відбулися в різних країнах світу в останні десятиліття. Запропоновано комплексний імовірнісно-статистичний підхід для дослідження режимної надійності ЕЕС при відмовах електрообладнання, який ґрунтується на використанні ризику в якості показника надійності, що дає можливість визначити ресурс працездатності та імовірність відмови обладнання на інтервалі часу спостереження, оцінювати ризик розвитку каскадної аварії та рівень важкості кінцевих станів системи в умовах невизнаності інформації.

Ключові слова: *режимна надійність, каскадна аварія, ризик, енергосистема, імовірність, статистичне моделювання.*

ANALYSIS OF METHODS FOR ASSESSING THE REGIME RELIABILITY OF POWER SYSTEMS IN THE CASE OF CASCADE DEVELOPMENT OF FAILURES

I. V. Zakliuka¹,

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Department of Renewable Energy Sources,
37 Peremohy Av., 03056 Kyiv, Ukraine
phone: (063)-412-2098, e-mail: ihorzakliuka1@gmail.com*

The causes and mechanisms of escalation of the most well-known system accidents and cascading failures that occurred in different countries of the world in recent decades are analyzed. A comprehensive probabilistic-statistical approach is proposed for studying the regime reliability of the electric power system during electrical equipment failures, which is based on the use of risk as an indicator of reliability, which makes it possible to determine the service life and the probability of equipment failure over the observation time interval, to assess the risk of cascading accidents and the severity level of the final states of the system in conditions of unrecognized information.

Keywords: *regime reliability, cascade failure, risk, power system, probability, statistical modeling.*

ORCID: ¹0009-0009-9743-4318.

Сучасні ЕЕС повинні забезпечувати безперебійне електропостачання споживачів, котре іноді порушується за тими чи іншими причинами. До найбільш тривалих і важких наслідків можуть призвести аварії в результаті каскадних процесів, за яких виникає послідовне відключення елементів енергосистеми, викликаючи відключення одного або декількох елементів системи. В сучасних складних багатоелементних ЕЕС виникають тисячі та більше збурень за рік, які викликаються різними причинами: короткими замиканнями (КЗ) на електрообладнанні, відключення або перевантаження лінії електропередач, несправність систем управління та захисту, удари блискавки в обладнання енергосистеми, відмовами електрообладнання внаслідок незадовільного технічного стану, помилки обслуговуючого персоналу, лавина напруги, вихід з ладу обладнання, кібератаки, зниження частоти та інші [1, 3]. Значна частка цих збурень усувається дією засобів релейного захисту і протиаварійної автоматики. Внаслідок відмов цих засобів, помилок персоналу та інших внутрішніх і зовнішніх факторів може виникати каскадний розвиток аварійної ситуації.

Наразі об'єктивно існує невідповідність між зміненням структурних властивостей сучасних потужних електричних систем, що визначає змінення умов функціонування і динамічних властивостей з одного боку, і старими принципами та засобами управління з іншого [4, 5].

Нарощування такої невідповідності призводить до виникнення «слабких місць» в енергосистемі, погіршенню її керованості, зниженню надійності та ефективності функціонування. Вирішення цих протиріч потребує удосконалення принципів і систем керування, перш за все систем протиаварійного керування, а також розробки і реалізації принципів превентивного керування електрообладнанням та енергосистемою в цілому [4, 5].

Зазвичай каскадні аварії мають системний характер і дії протиаварійної автоматики, оперативного персоналу направлені таким чином, щоби протистояти небажаному каскадному розвитку аварійної ситуації. Ретроспективний аналіз аварійних ситуацій, які супроводжуються великою кількістю різних за походженням подій, показує, що зазвичай можна виділити деякий ланцюг подій, який визначальним чином впливає на виникнення і розвиток аварійної ситуації.

На рис. 1 наведена статистика системних аварій в США за період 1991 – 2005 рр. звідки видно, що з часом кількість важких системних аварій і масштаби наслідків для споживачів з часом зростають [4]. Це підтверджує актуальність аналізу подібних аварій і потребує розробки заходів для їх попередження, переривання розвитку й ліквідації.

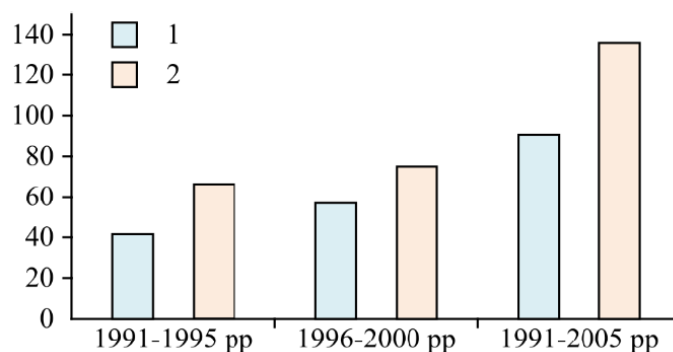


Рис. 1. Кількість важких системних аварій, що зачіпають 50000 і більше споживачів (1) і мають рівень аварійного споживачів, що відключаються, сумарною потужністю 100 МВт (2), в США за 1991 – 2005 рр.

Аналіз практики експлуатації ЕЕС країн [6, 7] показує, що всі найбільші системні аварії останнього часу, які відбулися в США (1997 р.), Канаді (2003 р.), Італії (2003 р.), викликані неповною відповідністю наявної системи підтримки надійності функціонування енергооб'єктів та енергооб'єднань новим ринковим умовам.

З точки зору ризику виникнення аварії можна виділити три градації змінення станів в ЕЕС, пов'язаних з процесом перерозподілу потоків активної та реактивної потужності, які залежать в основному від змінення напруги у вузлах: погіршення, покращення, незначне змінення стану, яке виявляється в зниженні, підвищенні та незначному зміненні запасів пропускної здатності основної мережі та резервів генеруючої потужності [4]. Кожна подія, а саме деякій причині, яка викликає або перешкоджає зміненню стану ЕЕС характеризується: імовірністю появи події; направленістю події на покращення або погіршення стану ЕЕС; системним ефектом події (силу впливу її на стан ЕЕС), тобто кількісну міру змінення стану ЕЕС під впливом події.

Динаміка поведінки ЕЕС в аварійних ситуаціях каскадного характеру кожен раз має індивідуальні особливості, які залежать від властивостей конкретної системи, її режимів, місць і важкості збурень, ефективності систем керування. З урахуванням викладених вище особливостей каскадного розвитку аварійних процесів можна сформулювати вимоги до математичних моделей для дослідження таких складних процесів.

В межах цієї роботи розглядаються питання, які стосуються статичної режимної надійності ЕЕС.

Одним з підходів до оцінки статичної режимної надійності ЕЕС є підхід, пов'язаний з розрахунком послідовності сталих режимів при моделюванні каскадного розвитку відмов [1 – 3].

В якості інтегрального показника функціонування об'єктів енергетики часто використовують показник ризику [1, 8, 9]. В останні десятиріччя для прийняття ефективних рішень щодо стратегії управління режимами ЕЕС в промислово розвинених країнах використовують стратегію ризик-менеджменту [1, 2, 8].

У загальному випадку при каскадному розвитку первинної відмови враховуються ймовірності відмов захистів, що відключають елементи мережі при неприпустимих параметрах їх режиму [2]. При цьому ймовірності станів

системи в результаті каскадних відмов з урахуванням незалежності відповідних випадкових подій визначаються за формулою [9]:

$$p_l(D_l) = \sum_{i,j} \prod_i q_i \prod_{j \neq i} p_j, \quad l = \overline{1, L}$$

де $p_l(D_l)$ – ймовірність дефіциту потужності величиною D_l в розглянутому стані l системи; q_i – ймовірність відмови елемента або захисту; p_j – ймовірність безвідмовної роботи елемента або захисту; i, j – номери елементів ЕЕС

Як показник для оцінки режимної надійності в даному випадку часто використовується показник ризику, який визначається за формулою [8, 9]:

$$R_k = \sum_{l=1}^L p_l(D_l) \cdot D_l, \quad k = \overline{1, K},$$

де K – кількість первинних відмов.

Висновки. Проаналізовано причини та механізми розвитку найбільш важких системних аварій, які виникали в сучасних ЕЕС. Наведено аналітичні залежності для визначення ймовірності станів системи в результаті каскадних відмов та ризику як інтегрального показника оцінки режимної надійності.

ПОСИЛАННЯ

1. 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*. 2019. № 2(16). С. 105-117.
2. Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. / -К.:НТУУ "КПІ", 2011. - 148 с.
3. Operational Risk Assessment and control: A probabilistic approach / E. Ciapessoni et al. *2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, Gothenburg, Sweden, 11–13 October 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/isgteurope.2010.5638975>.
4. McDonald J. D. F., Pal B. C. Representing the risk imposed by different strategies of distribution system operation. *2006 IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Montreal, Que., Canada, 18–22 June 2006. 2006. URL: <https://doi.org/10.1109/pes.2006.1709550>.
5. Phuangpornpitak N., Tia S. Opportunities and Challenges of Integrating Renewable Energy in Smart Grid System. *Energy Procedia*. 2013. Vol. 34. P. 282–290. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.06.756>.
6. Veloza O. P., Santamaria F. Analysis of major blackouts from 2003 to 2015: Classification of incidents and re-view of main causes. *The Electricity Journal*. 2016. Vol. 29, no. 7. P. 42–49. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tej.2016.08.006>.
7. Pourbeik P., Kundur P. S., Taylor C. W. The anatomy of a power grid blackout - Root causes and dynamics of recent major blackouts. *IEEE Power and Energy Magazine*. 2006. Vol. 4, no. 5. P. 22–29. URL: <https://doi.org/10.1109/mpae.2006.1687814>.
8. Escalera A., Hayes B., Prodanović M. A survey of reliability assessment techniques for modern distribution networks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2018. Vol. 91. P. 344–357. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.02.031>.
9. A Review of Risk Assessment Methods for Power System / L. Zhao et al. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 139. P. 00175. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201713900175>.

УДК 620.9

ОБГРУНТУВАННЯ МОЖЛИВИХ СЦЕНАРІЇВ ЗАМІЩЕННЯ ПАЛИВА НА ЗРУЙНОВАНИХ ВУГІЛЬНИХ ТЕС УКРАЇНИ

Н. П. Іваненко¹, О. Є. Маляренко²

^{1,2} Інститут загальної енергетики НАН України,

вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,

²тел.: (066) 848-17-37, e-mail: malyarenlena@gmail.com

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використано метод аналізу середньозваженої собівартості енергії за життєвий цикл та метод порівняння.

Ключові слова: паливо, вугілля, біопаливо, електрична енергія, собівартість енергії, життєвий цикл.

RATIONALE FOR POSSIBLE FUEL SUBSTITUTION SCENARIOS AT DESTROYED COAL-FIRED POWER PLANTS IN UKRAINE

N. P. Ivanenko¹, O. Ye. Maliarenko²

^{1,2} General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,

172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150

²phone: (066) 848-17-37, e-mail: malyarenlena@gmail.com

To solve the tasks set in this study, the levelized cost of energy (LCOE) life-cycle analysis method and the comparative method were used.

Key words: fuel, coal, biofuel, electric energy, cost of energy, life cycle.

ORCID: ¹0000-0001-5438-1556; ²0000-0001-5882-916X.

Метою цього дослідження є оцінка економічної доцільності різних варіантів трансформації теплових електростанцій України на вугіллі шляхом порівняння кількох запропонованих сценаріїв розвитку за наступними критеріями: середньозважена собівартість електроенергії (LCOE), питомі викиди CO₂, потреба в паливі та інвестиціях. Розрахунки базуються на прикладах міжнародного досвіду та доступних статистичних даних.

Для моделювання обрано наступні сценарії (А–Е), які охоплюють найбільш доступні напрями розвитку сектору теплової енергетики на твердому паливі. Вони відрізняються типом палива, рівнем ефективності, технологічним станом та рівнем інвестицій.

Сценарій А — Базовий (вугілля) для порівняння.

Цей сценарій відображає поточний стан більшості українських ТЕС, що працюють чи працювали на кам'яному вугіллі. На початок 2025 р. працювало 6 ТЕС на вугіллі, а після обстрілу 08.11.2025 було пошкоджено ще 3. Середній ККД таких енергоблоків становить 33–36%, а питомі викиди CO₂ — 0,9–1,1 т/МВт•год [1]. Перевага: наявна інфраструктура. Недоліки: висока собівартість через старіння обладнання, дорогі ремонти, великі викиди як ПГ, так і забруднюючих речовин.

Сценарій В — Кофайринг (вугілля + біомаса).

Передбачає заміщення до 20% енергетичного вугілля місцевою біомасою (агровідходи, лушпиння, пелети). Це знижує викиди CO₂ на 15–20% [2, 3] та дозволяє скористатися механізмами підтримки біоенергетики. Подібні рішення реалізовані у Польщі (Електростанція Połaniec, 205 МВт на біомасі) [3], кофайринг був реалізований на зруйнованій вдруге Трипільській ТЕС. Для цього сценарію характерні відносно низькі інвестиційні витрати (CAPEX ≈ 150 €/кВт). Недоліком є необхідність стабільних поставок біомаси.

Сценарій С — Повна конверсія на біомасу.

Передбачає повну заміну палива на деревну або агробіомасу. Приклад: британська компанія Drax Power перевела чотири блоки (по 645 МВт) з вугілля на деревні гранули, інвестувавши понад 800 млн фунтів стерлінгів. Викиди CO₂ скоротилися на 85% [4]. Головною перевагою є майже повна декарбонізація генерації. До недоліків слід віднести високу вартість палива (біопаливо ≈ 120 €/т) і потребу у складській логістиці. В умовах війни це складний процес.

Сценарій Е — Модернізація існуючих ТЕС з очищенням викидів.

На працюючих вугільних енергоблоках потрібно очищувати відхідні гази від оксидів азоту, уловлювати сірку та пил. Передбачає встановлення систем десульфуризації (FGD), селективного каталітичного відновлення (SCR) і модернізацію турбін. Фільтри для уловлення пилу на ТЕС були встановлені. Подібні програми впроваджено у Німеччині (RWE, Uniper) [5]. За цього сценарію ресурс електростанцій подовжується на 10–15 років, але необхідні значні капітальні витрати (CAPEX $\approx$ 400 €/кВт), при цьому з точки зору декарбонізації спостерігається обмежений ефект.

Результати розрахунків за запропонованими сценаріями наведені в табл.1.

Таблиця 1 – Результати розрахунків

Сценарій	Паливо	η (%)	LCOE (€/МВт·год)	Викиди CO ₂ (т/МВт·год)	Питомі капітальні витрати (€/кВт)	Потреба в паливі (т/рік)
А - базовий	Вугілля	36	87	0.95	150	620 000
В - кофайринг	Вугілля + біомаса	35	82	0.78	200	580 000
С - біомаса	Біомаса	34	105	0.12	700	540 000
Е – базовий з очищенням (FGD + SCR)	Вугілля	36	92	0.90	400	610 000

Таким чином, найнижчий LCOE [6] досягається для сценарію В (кофайринг) — близько 82 €/МВт·год, має нижчі питомі викиди CO₂.

Біоенергетичний варіант (С) має найвищу собівартість, однак значно знижує викиди CO₂ (до 87% у порівнянні з базовим сценарієм).

Впровадження очищення забруднюючих речовин FGD/SCR (Е) суттєво знижує локальні забруднення (SO₂, NO_x, пил), але не зменшує CO₂, тому екологічний ефект обмежений.

Серед технічних ризиків реалізації запропонованих сценаріїв слід зазначити зношення обладнання, що може призвести до непередбачуваних відключень, залежність впровадження імпортованих технологій (SCR) від валютного курсу та постачання компонентів, потребу у стабільному ланцюгу постачання, включно зі зберіганням і якістю сировини для біомаси.

Фінансові ризики включають зміни у цінах на паливо та CO₂ квоти, які безпосередньо впливають на рентабельність, потребу у державних гарантіях або міжнародному фінансуванні для сценарію С, враховуючи високі початкові капітальні витрати, складність застосування механізму системи торгівлі викидами в зв'язку з недостатньою ліквідністю ринку викидів в Україні.

Регуляторні ризики включають відсутність чітких правил щодо сертифікації біопалива, нестабільність тарифної політики і зміна нормативів, а також затримка з імплементацією директив ЄС щодо викидів (IED 2010/75/EU).

Серед соціально-економічних ризиків зазначимо потребу у перекваліфікації працівників і розвитку нових компетенцій, необхідність узгодження екологічних пріоритетів із соціальними наслідками для регіонів.

ПОСИЛАННЯ

1. International Energy Agency (IEA). Coal-Fired Power Generation: Efficiency and Emissions. <https://www.iea.org/reports/coal-fired-power> (дата звернення: 15.02.2026).
2. International Renewable Energy Agency (IRENA). Renewable Power Generation Costs in 2023. <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023> (дата звернення: 15.02.2026).
3. IEA Bioenergy. Biomass Co-firing in Coal Power Plants. <https://www.ieabioenergy.com/blog/publications/biomass-co-firing-in-coal-power-plants/> (дата звернення: 15.02.2026).
4. Drax Group. Drax Power Station – Biomass generation and decarbonisation. <https://www.drax.com/about-us/our-sites-and-capabilities/drax-power-station/> (дата звернення: 15.02.2026).
5. European Commission. Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Large Combustion Plants). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32010L0075> (дата звернення: 15.02.2026).
6. IEA. Projected Costs of Generating Electricity – Levelised Cost of Electricity (LCOE). <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity> (дата звернення: 15.02.2026).

ВИКОРИСТАННЯ НИЗЬКОВОЛЬТНОГО ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ СИСТЕМ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

М. А. Коваленко¹, І. Я. Коваленко², Є. О. Тітов³, О. О. Базаров⁴

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
03056, м. Київ, пр. Перемоги 37,
Тел./факс +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko87ma@gmail.com

Розвиток децентралізованої енергетики та відновлюваних джерел енергії зумовлює потребу у створенні надійних та ефективних автономних енергоустановок. Перспективним рішенням є використання низьковольтних генераторів з постійними магнітами, які відзначаються високими питомими енергетичними показниками, компактністю та спрощеною інтеграцією з системами накопичення енергії та силовими перетворювачами. У роботі розглянуто розробку конструкції такого генератора для роботи у складі автономних енергетичних установок на базі відновлюваних джерел енергії. Практична значимість дослідження полягає у створенні ефективного рішення для живлення віддалених споживачів, критичної інфраструктури та модульних мікромереж.

Ключові слова: Генератори з постійними магнітами, відновлювальні джерела енергії, автономні енергоустановки, енергоефективність, електропостачання, генераторні системи.

USE OF A LOW-VOLTAGE POWER SOURCE FOR RENEWABLE ENERGY SYSTEMS

M. A. Kovalenko¹, I. Ya. Kovalenko², Y. O. Titov³, O. O. Bazarov⁴

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056
Tel./fax +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko87ma@gmail.com

The development of decentralized energy systems and renewable energy sources creates a need for reliable and efficient off-grid power generation systems. A promising solution is the use of low-voltage permanent magnet generators, which are characterized by high specific energy performance, compactness, and simplified integration with energy storage systems and power converters. This paper discusses the design of such a generator for use in autonomous power plants based on renewable energy sources. The practical significance of this research lies in the creation of an effective solution for powering remote consumers, critical infrastructure, and modular microgrids.

Keywords: Permanent magnet generators, renewable energy sources, off-grid power systems, energy efficiency, power supply, generator systems.

ORCID: ¹0000-0002-5602-2001; ²0000-0003-1097-2041; ³0009-0007-8222-7477, ⁴0009-0008-8491-2678

Сучасна енергетика характеризується фундаментальним переходом від централізованої моделі до децентралізованих систем з високою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Ця трансформація зумовлює стрімке зростання попиту на автономні енергоустановки, здатні забезпечувати стабільне та якісне електропостачання в умовах віддаленості від магістральних мереж, нестабільності генерації від ВДЕ та жорстких вимог до екологічної безпеки. Генератори з постійними магнітами (ГПМ) є одним із найбільш перспективних класів таких установок завдяки поєднанню високої надійності (відсутність ковзних контактів та обмоток збудження), компактності, високих питомих масогабаритних та енергетичних показників. Окрему нішу займають низьковольтні генератори з постійними магнітами, оскільки їх використання дозволяє суттєво спростити архітектуру силового тракту автономних енергетичних систем. Після випрямлення трифазної напруги генератора формується низьковольтна DC-шина, яка може безпосередньо використовуватись для живлення МРРТ-контролерів, DC/DC-перетворювачів та систем накопичення енергії. Такий підхід знижує вимоги до електричної ізоляції, спрощує забезпечення електробезпеки під час експлуатації та обслуговування, а також полегшує інтеграцію генераторної установки з акумуляторними батареями та сучасними силовими напівпровідниковими перетворювачами. Ескіз конструкції запропонованого низьковольтного генератора з постійними магнітами наведено на рисунку 1, а його основні розрахункові характеристики — номінальна потужність, напруга, струм та коефіцієнт потужності — представлено в таблиці 1.

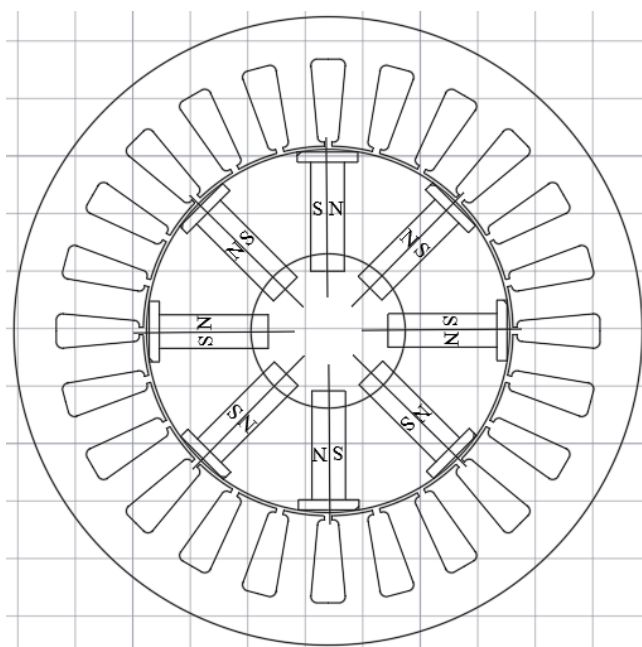


Рисунок 1. Ескіз низьковольтного генератора з постійними магнітами

Таблиця 1. Основні розрахункові характеристики низьковольтного генератора з постійними магнітами

Потужність, кВт	7,5 кВт
Номінальна напруга, В	27В
Коефіцієнт потужності, cos φ	0,88
Номінальний струм, А	182А

У даній роботі розглядається концепція низьковольтного генератора з постійними магнітами на напругу 27 В, призначеного для використання в автономних гібридних енергокомплексах на основі відновлюваних джерел енергії. Для підвищення технологічності та зниження вартості запропоновано використовувати магнітопровід статора від серійного асинхронного двигуна АІР112М2 У2, що дозволяє уникнути витрат на проектування нового штампового оснащення. Такий підхід відкриває можливості для оптимізації геометрії зубцевої зони, вибору раціональної топології ротора та розрахунку обмотувальних даних, необхідних для забезпечення стабільної вихідної напруги в усьому діапазоні робочих швидкостей. Особлива увага приділяється аналізу електромагнітних процесів, визначенню оптимального співвідношення "кількість полюсів – частота обертання" та методам стабілізації напруги за умов змінних режимів роботи, характерних для вітро- та сонячних установок.

Практична значимість роботи полягає в обґрунтуванні конкурентоспроможного рішення для забезпечення енергонезалежності віддалених об'єктів, сільських споживачів та критичної інфраструктури. Запропонована конструкція генератора з використанням статора двигуна АІР112М2 У2 представлена на рисунку, а його основні розрахункові характеристики — потужність, струм, напруга, коефіцієнт потужності — зведені в таблицю. Такий генератор може бути інтегрований у гібридні системи типу "вітро-сонячний генератор – накопичувач – навантаження" та слугувати базовим елементом модульних мікромереж, здатних працювати як паралельно з централізованою мережею, так і в повністю автономному режимі.

ПОСИЛАННЯ

1. Коваленко М.А., Головка В.М., Коваленко І.Я., Святненко В.А. Експериментальна оцінка корекції потужності генератора автономної вітроелектроустановки. Електротехніка та електроненергетика. 2022. №1. – с. 8-18
2. Kovalenko M.A., Tsyplenkov D.V., Kovalenko I.Ya., Titov E.O., Bazarov O.O Mathematical simulation of brushless high-speed permanent magnet motor. Naukovyі Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2025, № 4, 108-116. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/108>
3. Y. Titov, M. Kovalenko, I. Tkachuk, I. Kovalenko and O. Bazarov, "Using an Uninterrupted Power Supply to Reduce the Operating Costs of an Autonomous Electric Generator," 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288689.

УДК 621.31

RENEWABLE ENERGY STORAGE FROM SECOND-LIFE BATTERIES FOR POWER SYSTEM FLEXIBILITY

G.P. Kostenko¹, A.O. Zaporozhets²

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (044) 294-67-01, e-mail: Kostenko_HP@nas.gov.ua

The increasing share of renewable energy sources requires flexible energy storage solutions capable of stabilizing power systems under variable generation conditions. Second-life electric vehicle batteries represent a promising option for stationary energy storage due to their remaining capacity and relatively low cost. This study examines the potential use of second-life batteries for renewable energy storage and analyzes their role in improving power system flexibility in various operational scenarios

Key words: energy storage, renewable energy sources, second life batteries, power system flexibility, RES integration.

ORCID: ¹0000-0002-8839-7633; ²0000-0002-0704-4116.

НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ УСТАНОВКАМИ НА ОСНОВІ ВТОРИННИХ БАТАРЕЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Г.П. Костенко¹, А.О. Запорожець²

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (044) 294-67-01, e-mail: Kostenko_HP@nas.gov.ua

Зростання частки відновлюваних джерел енергії потребує гнучких систем накопичення енергії, здатних забезпечувати стабільність енергосистем в умовах змінної генерації. Вторинні батареї електротранспорту є перспективним рішенням для стаціонарних систем накопичення енергії завдяки збереженню значної частини їхньої ємності та відносно нижчій вартості. Розглянуто можливості використання вторинних батарей для накопичення енергії відновлюваних джерел та проаналізовано їхню роль у підвищенні гнучкості енергосистеми в різних сценаріях експлуатації.

Ключові слова: накопичення енергії, відновлювані джерела енергії (ВДЕ), вторинні батареї електро-транспорту, гнучкість енергосистеми, інтеграція ВДЕ.

The rapid expansion of renewable energy sources significantly increases the variability of electricity generation, creating additional challenges for power system operation and need for power system flexibility. Power system flexibility can be broadly defined as the ability of the power system to adapt its generation, consumption, or storage patterns dynamically in response to internal or external fluctuations [1-2]. As it is shown in Figure, power system flexibility arises from the coordinated operation of multiple elements across the generation, transmission, distribution, and consumer levels, with electric vehicles increasingly recognized as an active component of this architecture.

Energy storage technologies play a key role in balancing generation and consumption, reducing peak loads, and improving grid stability. However, the high cost of new battery systems remains a significant barrier to large-scale deployment of energy storage in renewable energy systems. At the same time, the growing number of electric vehicles leads to a gradual increase in the volume of lithium-ion batteries reaching the end of their automotive service life. Although these batteries may no longer meet the performance requirements of electric vehicles, they often retain 70–80% of their original capacity and can be repurposed for stationary energy storage applications [3-5].

Second-life electric vehicle batteries can be effectively used for several applications in renewable energy systems. One of the most important applications is the smoothing of short-term fluctuations in solar and wind generation. In such cases, battery storage absorbs excess energy during periods of high generation and releases it during periods of reduced renewable output. Another important application is peak load management, where battery systems help reduce stress

on power grids by supplying stored energy during peak demand periods. In addition, second-life batteries can serve as backup energy sources for critical infrastructure and distributed energy systems [5].

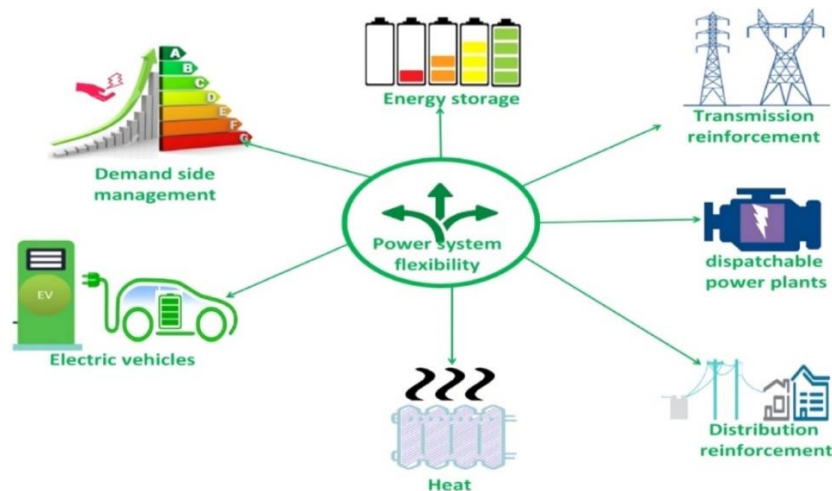


Figure. Main sources contributing to power system flexibility [2]

Despite these advantages, the integration of second-life batteries into renewable energy systems requires careful consideration of battery degradation, operational reliability, and economic feasibility. The heterogeneous degradation patterns of used batteries create uncertainty in estimating their remaining useful life and operational performance. Therefore, the development of integrated management approaches combining degradation assessment, performance monitoring, and adaptive operational control becomes an important task for ensuring the efficient use of second-life batteries in energy storage systems.

Second-life electric vehicle batteries can be applied in several operational scenarios within renewable energy systems. Their remaining capacity and relatively low cost make them suitable for stationary energy storage applications aimed at improving the flexibility and reliability of power systems with a high share of renewable generation. The main application scenarios of second-life batteries in renewable energy systems are summarized in Table.

Table. Application scenarios of second-life EV batteries in renewable energy systems

<i>Application scenario</i>	<i>Main function</i>	<i>Expected effect</i>
Renewable generation smoothing	Storage of surplus energy during periods of high solar and wind generation	Reduction of generation fluctuations and improved system stability
Peak load management	Use of stored energy during peak demand periods	Reduced stress on power grids and improved operational efficiency
Backup power supply	Provision of reserve power for local energy systems and critical infrastructure	Increased reliability and resilience of power systems

The use of second-life electric vehicle batteries in these scenarios allows not only to improve power system flexibility but also to reduce the cost of energy storage compared with new lithium-ion battery systems. In addition, the repurposing of EV batteries extends their lifecycle and contributes to the principles of circular economy in the energy sector. As renewable generation continues to expand, second-life batteries may become an important component of flexible and sustainable energy storage solutions.

Second-life electric vehicle batteries represent a promising and cost-effective solution for renewable energy storage. Their application can improve power system flexibility, enhance the stability of renewable generation, and extend the lifecycle of lithium-ion batteries. Further research should focus on the development of analytical models and decision-support tools for the effective integration of second-life batteries into modern renewable energy systems.

REFERENCES:

1. Paul Denholm, Maureen Hand, Grid flexibility and storage required to achieve very high penetration of variable renewable electricity, *Energy Policy*, Volume 39, Issue 3, 2011, Pages 1817-1830, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.01.019>.
2. O.M. Babatunde, J.L. Munda, Y. Hamam, Power system flexibility: A review, *Energy Reports*, Vol. 6, Supplement 2, 2020, P. 101-106, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.11.048>.
3. 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>
4. Zaporozhets, A., Babak, V., Kostenko, G., Zgurovets, O., Denisov, V., & Nechaieva, T. (2024). Power System Resilience: An Overview of Current Metrics and Assessment Criteria. In V. Babak, A. Zaporozhets (Eds.), *Systems, Decision and Control in Energy VI*, 561 (pp. 35–58). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-68372-5_2
5. Kostenko, G., & Zaporozhets, A. (2025). Trigger-Based PDCA Framework for Sustainable Grid Integration of Second-Life EV Batteries. *World Electric Vehicle Journal*, 16(10), 584. <https://doi.org/10.3390/wevj16100584>

УДК 620.179.14

АНАЛІЗ НОРМАТИВНИХ ВИМОГ ТА ЄВРОПЕЙСЬКОГО ДОСВІДУ З ПРОВЕДЕННЯ МОНІТОРИНГУ АТМОСФЕРНОГО ПОВІТРЯ В ОКОЛІ ОБ'ЄКТІВ ЕНЕРГЕТИКИ

Куликівський О. В.¹, Пономаренко О. В.²,

^{1,2} Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м.Київ, 03150, Україна,
тел.: +38(096) 895-03-27, e-mail: sashkovskiy99@gmail.com

У роботі проаналізовано нормативні вимоги та європейський досвід проведення моніторингу атмосферного повітря в околі об'єктів енергетики. Розглянуто українську нормативну базу, зокрема ДСанПаН, накази МОЗ, ГКД 34.02.305-2002, а також міжнародні стандарти DSTU ISO 14001:2015 і DSTU ISO 14031:2016. Особливу увагу приділено системі оцінювання результативності екологічної діяльності на основі показників MPI та OPI. Показано відмінності між національними та європейськими підходами й обґрунтовано доцільність їх інтеграції для підвищення точності та зіставності результатів моніторингу.

Ключові слова: моніторинг атмосферного повітря, об'єкти енергетики, нормативні вимоги, екологічна безпека, забруднювачі повітря, леткі органічні сполуки, $PM_{2.5}$, PM_{10} , екологічне управління.

ANALYSIS OF REGULATORY REQUIREMENTS AND EUROPEAN EXPERIENCE IN MONITORING OF ATMOSPHERIC AIR QUALITY AROUND ENERGY FACILITIES

Kulykivskiy O. V., Ponomarenko O. V.,

General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone.: +38(096) 895-03-27, e-mail: sashkovskiy99@gmail.com

The study analyzes regulatory requirements and European experience in air quality monitoring. The Ukrainian regulatory framework (DSanPiN, Ministry of Health orders, GKD 34.02.305-2002) and international ISO standards, in particular DSTU ISO 14001:2015 and DSTU ISO 14031:2016, are reviewed. Special attention is paid to the Environmental Performance Evaluation (EPE) system, based on MPI and OPI indicators. Differences in approaches are highlighted: the comprehensiveness of Ukrainian documents versus the narrow specialization of European standards. The conclusion emphasizes the feasibility of integrating national and international methodologies to improve the accuracy and comparability of monitoring results.

Keywords: air quality monitoring, energetic facilities, regulatory requirements, environment safety, air pollutants, volatile organic compounds, $PM_{2.5}$, PM_{10} , environmental management..

ORCID: ¹0009-0006-8593-8795; ²0000-0002-6538-0468.

Якість атмосферного повітря є одним з визначальних чинників, що впливають на стан довкілля та здоров'я населення. Зростання техногенного навантаження, урбанізаційні процеси та глобальні кліматичні зміни висувають нові вимоги до систем моніторингу. Відповідно, інтеграція міжнародного та європейського досвіду у національну практику стає пріоритетом розвитку України у сфері екологічної безпеки. Метою цієї роботи є аналіз нормативних документів, що регламентують моніторинг атмосферного повітря, зокрема в околі об'єктів енергетики, та порівняння національної практики з європейськими підходами.

До основних забруднювачів, що контролюються як на національному, так і на міжнародному рівнях, належать: оксид вуглецю (CO), діоксид азоту (NO₂), діоксид сірки (SO₂), тверді частинки $PM_{2.5}$ та PM_{10} , озон (O₃), леткі органічні сполуки, бенз(а)пірен, свинець та інші важкі метали. Визначення їх концентрацій є критично важливим для оцінювання ризиків для здоров'я людини та розроблення політики зменшення викидів [1]. Вимоги ДСанПіН щодо ГДК цих речовин загалом узгоджуються з рекомендаціями ВООЗ та європейськими директивами, однак залишаються окремі розбіжності, що потребують гармонізації [2, 3].

Огляд європейських нормативних документів із визначення концентрації забруднювача стану атмосферного повітря зводиться до того, що у європейській практиці стандарти для визначення зважених частинок $PM_{2.5}$ та PM_{10} мають чітку спеціалізацію й орієнтовані насамперед на моніторинг атмосферного повітря у населених пунктах. Їх мета – забезпечення порівнянності результатів у різних країнах та оцінка ризиків для здоров'я населення. Для кожного конкретного забруднювача (наприклад, CO , NO_2 , $PM_{2.5}$) існує окремий референтний стандарт із визначеними діапазонами чутливості та вимогами до точності. Основний акцент робиться на використанні сучасних автоматизованих систем (гравіметричних та оптичних методів), що дозволяють визначати навіть низькі концентрації у межах $1\text{--}5\text{ мкг/м}^3$. Таким чином, у ЄС існує повний, спеціалізований ланцюг стандартів ($ISO\ 7708 \rightarrow EN\ 12341 \rightarrow ISO\ 21501-4$ тощо), який охоплює весь процес від класифікації фракцій до вимірювання концентрацій у повітрі [4, 5].

Так наприклад, для повного визначення концентрації летких органічних сполук у повітрі у серії стандартів $ISO\ 16000$ простежується чіткий послідовний ланцюг дій, що забезпечує коректне визначення концентрацій летких органічних сполук (VOC) у повітрі приміщень або у випробувальних камерах. Першим етапом є $ISO\ 16000-34:2019$, який регламентує правила відбору зразків матеріалів, їх належне зберігання та підготовку до випробувань. Далі застосовується $ISO\ 16000-9:2006$, що описує метод випробувальної камери: зразок розміщується у контрольованому середовищі, де відбувається емісія VOC . На наступному етапі відповідно до $ISO\ 16000-11:2006$ здійснюється відбір проб повітря з камери за допомогою сорбційних трубок із визначеними умовами зберігання. Завершальним кроком є вимірювання концентрацій летких органічних сполук методом газової хроматографії з мас-спектрометрією ($GC-MS$) згідно зі стандартом $ISO\ 16000-6:2011/2019$. Таким чином, уся процедура, від відбору зразків матеріалів до кінцевого аналітичного визначення концентрацій VOC , охоплена узгодженим ланцюгом стандартів, що гарантує відтворюваність та порівнянність результатів у міжнародній практиці [6, 7].

В Україні підхід має інший характер: нормативні документи здебільшого розроблялися для контролю промислових викидів і тому охоплюють значно ширші діапазони концентрацій – від мінімальних до сотень $мг/м^3$. Часто один документ регламентує відразу кілька речовин і методів, що робить його комплексним, але менш вузькоспеціалізованим. Традиційно йшлося про "завислі речовини" без поділу на $PM_{2.5}$ та PM_{10} , і лише останні роки (методичні рекомендації ЦГО 2021 р. та наказ МОЗ № 813 від 2024 р.) закріпили сучасний поділ на фракції. Вимірювання досі часто проводяться лабораторними методами, хоча поступово в практику інтегруються автоматизовані монітори. Тому в Україні наразі діє радше фрагментарна система (нормативи + методики промислових вимірювань + рекомендації), яка поступово наближається до європейської, але ще не має власного єдиного референтного стандарту для $PM_{2.5}/PM_{10}$ [2, 8].

Європейський підхід до моніторингу базується на уніфікації методик, широкому застосуванню автоматизованих систем вимірювань та відкритості екологічної інформації. В Україні система перебуває на етапі модернізації: триває впровадження автоматизованих постів спостережень, однак більшість вимірювань досі проводиться традиційними лабораторними методами. Це створює проблеми з оперативністю та порівнянністю даних. Гармонізація українських стандартів із європейськими є необхідною умовою інтеграції у загальноєвропейську систему контролю якості повітря [9].

У результаті розбіжностей між національною та європейською практикою, а також прагнення України до гармонізації з міжнародними вимогами, виникають так звані «натуралізовані стандарти». Вони поєднують положення міжнародних ISO з особливостями національної системи, формуючи узгоджений підхід до екологічного управління. Прикладами таких документів є ДСТУ $ISO\ 14031:2016$, що визначає методику оцінювання показників екологічної ефективності підприємств (MPI , OPI), та ДСТУ $ISO\ 14001:2015$, який встановлює вимоги до систем екологічного менеджменту на основі принципу $PDCA$. Таке поєднання дозволяє забезпечити перехід від фрагментарності до уніфікованої системи контролю, сумісної з європейськими практиками [10].

Найбільше значення для екологічного управління в Україні має ДСТУ $ISO\ 14031:2016$ «Екологічне управління. Оцінювання екологічної дієвості. Настанови». У ньому описано підхід до оцінювання екологічної результативності за трьома групами показників:

- ECI (Environmental Condition Indicators) – фактичний стан довкілля (концентрації забруднювачів у повітрі, воді, ґрунті, організмах).
- MPI (Management Performance Indicators) – управлінські заходи (екологічна політика, програми, навчання персоналу, аудит, ризик-менеджмент).
- OPI (Operational Performance Indicators) – фактичні результати виробничої діяльності (споживання ресурсів, рівні викидів, відходів, ефективність переробки).
- Стандарт не дає універсальних формул, але рекомендує застосовувати питомі та відносні показники, що дозволяють порівнювати результати в часі та між підприємствами. Наприклад:
- MPI : частка працівників, що пройшли екологічне навчання (%).

- OPI: питомі викиди на одиницю продукції, частка відходів, що утилізуються (%) [10].

Водночас ДСТУ ISO 14031:2016 є рамковим документом і не може застосовуватися без додаткового теоретичного, математичного та програмного забезпечення. Він задає загальну структуру оцінки, але потребує практичних методик і нормативних баз.

Другим ключовим документом є ДСТУ ISO 14001:2015 «Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосовування», що визначає вимоги до системи екологічного менеджменту на основі циклу PDCA (Plan – Do – Check – Act). Цей підхід дозволяє організації інтегрувати екологічні аспекти у свою стратегію розвитку, постійно підвищувати результативність і знижувати негативний вплив на довкілля.

Таким чином, поява «натуралізованих стандартів» (ДСТУ ISO 14031:2016, ДСТУ ISO 14001:2015) демонструє прагнення України до гармонізації з європейськими підходами. Вони створюють основу для формування уніфікованої системи екологічного управління, що поєднує вимоги міжнародних документів із національною практикою та забезпечує перехід від фрагментарності до системності у сфері моніторингу й контролю. Водночас поява таких стандартів має призвести до реновацій та розвитку процедурних дій, адже їхня логіка побудована на постійному вдосконаленні управлінських процесів, оновленні підходів до оцінки результативності та впровадженні сучасних інструментів екологічного менеджменту. Саме цей динамічний характер і робить систему дієвою, адаптивною та орієнтованою на сталий розвиток [10, 11].

ПОСИЛАННЯ

1. Бабак В. П., Запорожець А. О., Свердлова А. Д., Хайдуров В. В. Моделі та методи підвищення ефективності та безпеки функціонування теплоенергетичного обладнання: монографія. Київ: Наукова думка, 2024. 312 с. ISBN 978-617-554-373-3.
2. Міністерство охорони здоров'я України. Гігієнічні нормативи допустимих концентрацій хімічних речовин у повітрі населених місць: Наказ МОЗ України від 10 травня 2024 р. № 813. Київ, 2024.
3. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide. Geneva: World Health Organization, 2021. 273 p.
4. Ambient Air Quality Standards and Policies in the Eastern Mediterranean Region: A Review. International Journal of Public Health. 2023. Vol. 68. Article 1605352. DOI: <https://doi.org/10.3389/ijph.2023.1605352>.
5. Kulyivskiy, O., & Ponomarenko, O. (2025). Comparative analysis of methods and tools for ambient air quality monitoring. System Research in Energy, (3 (83), 81-91. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.03.081>
6. An overview of methodologies for the determination of volatile organic compounds in indoor air — повний текст доступний на сайті Tandfonline: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/05704928.2022.2085735>
7. Even M. Emissions of volatile organic compounds from polymeric materials. Indoor Air. 2020. Vol. 30, No. 2. P. 335–356. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12605>
8. Clean air in Europe for all! Taking stock of the proposed revision to the ambient air quality directives: a joint ERS, HEI and ISEE workshop report. European Respiratory Journal. 2023. Vol. 62, No. 4. Article 2301380. DOI: <https://doi.org/10.1183/13993003.01380-2023>
9. Моніторинг якості атмосферного повітря: український та міжнародний досвід. [Аналітична записка] / Кольцов М., Шевченко Л. — Київ: ГО «Фундація «Відкрите Суспільство», 2018. — 13 с.
10. BS EN ISO 14031:2013. Environmental management — Environmental performance evaluation — Guidelines (ISO 14031:2013). London: BSI Standards Limited, 2013. 50 p.
11. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосовування. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 28 с.

УДК 621.311.25

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ НАДІЙНІСТЮ ІЗОЛЬОВАНИХ МІКРОМЕРЕЖ З НАКОПИЧУВАЧАМИ ЕНЕРГІЇ

А. В. Давидков

Національний університет біоресурсів і природокористування України

вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна

phone: (050) 3590-70-39, e-mail: a.davydkov@nubip.edu.ua

При дослідженні систем управління надійністю ізольованих мікромереж з накопичувачами енергії були застосовані емпіричні та теоретичні методи на основі спроектованої моделі ізольованої мікромережі з накопичувачами енергії.

Ключові слова: ізольована мікромережа, накопичувачі енергії, розподілена генерація,

Децентралізація генерації, зростання частки відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) та воєнні ризики суттєво підвищують вимоги до надійності електропостачання критичних споживачів. Особливого значення набувають ізольовані мікромережі з системами накопичення енергії, які застосовуються на об'єктах критичної інфраструктури, у промисловості, аграрному секторі та для віддалених споживачів, що працюють в умовах обмежених ресурсів, нестабільної генерації, змінності навантажень, що вимагає вдосконалення підходів до управління їх надійністю. Традиційний підхід, що полягає в нарощуванні потужності резервних джерел чи ємності систем накопичення енергії (ESS) є затратним і не забезпечує ефективного використання ресурсів у змінних режимах. Бракує рішень, де надійність досягається узгодженою роботою кількох рівнів резерву: топології мережі, структурного резерву N-1/N-k, керування системами накопичення енергії, пріоритизації та селективного відключення навантажень, що зумовлює недовідпуск електроенергії та тривалі відмови.

Концепція багаторівневого резерву, де резерв трактується як стратегія керування, а не лише додаткове обладнання - це поєднання структурного резерву N-1/N-k, керування ESS як елемента резерву, динамічної класифікації навантажень і моделей керованого відключення та перерозподілу. Під час переходу до острівного режиму вирішальну роль відіграють джерела, здатні виконувати функції, що формують мережу (grid-forming), тобто формувати в ізольованій мікромережі цільові значення напруги, частоти та потужності. У такій ролі ефективно застосовуються синхронні генераторні установки — дизельні, газопоршневі та когенераційні. Механізм формування мережі синхронними установками полягає в тому, що після втрати зовнішнього джерела живлення вона переходить в острівний режим автономного живлення та починає підтримувати баланс активної і реактивної потужності. У структурі багаторівневої системи управління надійністю синхронні установки доцільно розглядати як резерв першого рівня, який забезпечує первинне утримання мережі після відокремлення мікромережі. Після початкової стабілізації до роботи можуть бути залучені інші рівні резерву: системи накопичення енергії для швидкодіючого покриття дефіциту потужності, керовані джерела розподіленої генерації, а також алгоритми пріоритизації та селективного відключення навантажень в залежності від їх категорії надійності електропостачання. Такий підхід дає змогу розглядати синхронні агрегати не лише як джерела генерації, а як активні елементи керування надійністю в острівному режимі.

Ефективність підхоплення мікромережі синхронними grid-forming установками визначається запасом регульовальної потужності, швидкодією систем автоматичного регулювання, динамікою пуску великих електроприймачів, а також узгодженістю з роботою інверторних джерел, що не формують мережу самостійно, а синхронізуються з уже існуючою мережею (grid-following), а також протиаварійної автоматики.

В якості grid-following джерел використовуються сонячні електростанції з мережевими інверторами, вітроустановки з керованими перетворювачами, системи накопичення енергії. Для підвищення надійності доцільним є використання координації синхронних генераторів з ESS, за якої синхронна установка формує мережу та несе базове навантаження, а накопичувач компенсує швидкі перехідні відхилення потужності. Таким чином, при переході мікромережі в острівний режим синхронні установки, що працюють як grid-forming джерела, виконують функції формування автономної мережі, первинної стабілізації частоти й напруги, прийняття небалансів потужності та забезпечення умов для підключення інших резервних ресурсів. Їх використання в складі багаторівневої системи управління надійністю дозволяє підвищити стійкість електропостачання критичних споживачів, зменшити ризик втрати живлення та скоротити тривалість аварійних режимів. Результати дослідження можуть бути використані під час проектування та експлуатації ізольованих мікромереж на об'єктах критичної інфраструктури, у

промисловості, аграрному секторі, на військових і віддалених об'єктах. Запровадження запропонованих методів дасть змогу підвищити автономність і надійність електропостачання без суттєвого збільшення потужності й ємності ESS та забезпечити пріоритетне живлення споживачів високої критичності.

ПОСИЛАННЯ

1. Федосеєнко. О. Ю. Керування та управління мікромережевими кластерами: розвиток та майбутні дослідження. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика, надійність та енергоефективність, No 2 (7) 2023.
2. URL: doi: 10.20998/2224-0349.2023.02.02
3. Кузнецов М.П. Особливості комбінованих енергосистем з відновлюваними джерелами енергії: монографія / М. П. Кузнецов. – Київ: ІБЕ, 2022. – 142с.
4. 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).
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: 04.11.2021).
6. Кузнецов М.П., Лисенко О.В., Мельник О.А. Особливості стохастичної оптимізації гібридних енергосистем на базі ВДЕ. Відновлювана енергетика. Київ, 2018. № 2. С. 5–16.
7. Zhao Y., Li H., Wan C., Du D., Chen B. Microgrid Energy Management Considering Energy Storage Degradation Cost // Batteries. 2025. Vol. 11. No. 5. Art. 169.
8. Safavi V., Mohammadi Vaniar A., Bazmohammadi N., Vasquez J. C., Keysan O., Guerrero J. M. A battery degradation-aware energy management system for agricultural microgrids // Journal of Energy Storage. 2025. Vol. 108. Art. 115059.
9. Santos M., Huo D., Wade N., Greenwood D., Sarantakos I. Reliability assessment of island multi-energy microgrids. Energy Conversion and Economics. 2021. Vol. 2. P. 169–182. DOI: 10.1049/enc2.12040.

АНАЛІЗ ПИТОМИХ ВАГОГАБАРИТНИХ ПОКАЗНИКІВ ВИСОКОШВИДКІСНИХ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ ТА ЗОВНІШНІМ РОТОРОМ

М. А. Коваленко¹, І. Я. Коваленко², Є. О. Тітов³, О. О. Базаров⁴

Національний технічний університет України
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
03056, м.Київ, пр. Перемоги 37,
Тел./факс +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko87ma@gmail.com

Проведено комплексний аналіз питомих показників високошвидкісних синхронних двигунів із постійними магнітами (ПМ) із зовнішнім ротором. Визначено залежності питомої потужності та питомого об'єму від розрахункової потужності (від 250 Вт до 15 кВт) та конструктивних параметрів. Встановлено оптимальні діапазони потужності для досягнення найкращих питомих характеристик.

Ключові слова: високошвидкісні двигуни, постійні магніти, питома потужність, ваго-габаритні показники, зовнішній ротор.

ANALYSIS OF SPECIFIC MASS-VOLUME INDICATORS OF HIGH-SPEED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS WITH EXTERNAL ROTOR

M.A. Kovalenko¹, I.Ya. Kovalenko², Y.O. Titov³, O.O. Bazarov⁴

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Peremohy Ave., Kyiv, 03056
Tel./fax +38-044-204-82-38, e-mail: kovalenko87ma@gmail.com

The paper provides a comprehensive analysis of the specific indicators of high-speed permanent magnet synchronous motors with an external rotor. The dependencies of specific power and specific volume on the calculated power (from 250 W to 15 kW) and design parameters are determined. Optimal power ranges for achieving the best specific characteristics are established.

Key words: high-speed motors, permanent magnets, specific power, weight and size indicators, external rotor.

ORCID: ¹0000-0002-5602-2001; ²0000-0003-1097-2041; ³0009-0007-8222-7477, ⁴0009-0008-8491-2678

Вступ. Сучасна тенденція розвитку електромеханіки спрямована на суттєве підвищення енергоефективності та мінімізацію маси перетворювачів енергії. Високошвидкісні синхронні двигуни (швидкість обертання >10 000 об/хв) стають ключовим компонентом у системах, де критичними є масогабаритні показники: в авіації, космічній галузі, мобільних роботах та високопродуктивних насосних агрегатах. Застосування постійних магнітів (ПМ) на основі рідкоземельних елементів, таких як NdFeB, дозволяє досягти високих значень магнітної індукції без додаткових витрат енергії на збудження, що забезпечує максимальний ККД у порівнянні з іншими типами машин. Конструкція із зовнішнім ротором є особливо перспективною, оскільки дозволяє розмістити більшу кількість полюсів на більшому радіусі, забезпечуючи вищу густину моменту та кращі умови для інтеграції двигуна безпосередньо у виконавчі механізми.

Мета роботи. Дослідження та кількісна оцінка динаміки зміни питомих характеристик високошвидкісних машин із зовнішнім ротором при масштабуванні їхньої потужності, а також виявлення фізичних та конструктивних обмежень, що впливають на ці показники.

Методика дослідження. Для проведення аналізу було розроблено алгоритм ітераційного розрахунку параметрів двигунів у діапазоні потужностей від 0,25 кВт до 15 кВт. Усі моделі базувалися на єдиному методологічному підході з фіксацією ключових електромагнітних параметрів: частота обертання ротора $n = 10\,000$ об/хв; магнітна індукція у повітряному зазорі $B\delta = 0,7$ Тл; лінійне навантаження статора $A = 20\,000$ А/м. Під час розрахунків враховувалися втрати у сталі статора, магнітні втрати в роторі та необхідна товщина механічного бандажа для утримання ПМ під дією відцентрових сил, які на таких швидкостях сягають значних величин.

Результати та їх обговорення. Аналіз отриманих даних дозволив виявити складні нелінійні залежності між потужністю та ефективністю використання матеріалів:

- 1. Питома потужність:** Результати моделювання показують, що показник (відношення корисної потужності до маси активних частин) має виражений максимум у зоні 7–9 кВт, де він досягає значень близько 80 Вт/кг. Зростання показника на початковому етапі (до 7 кВт) пояснюється «ефектом масштабу»: зі збільшенням розмірів машини частка маси допоміжних та конструктивних елементів (вал, підшипникові щити, ізоляція) відносно маси активних матеріалів зменшується.
- 2. Питомий об'єм:** Показник питомого об'єму (Вт/см³) демонструє найбільш стабільні та високі значення в діапазоні 1,5–4,5 кВт. Це свідчить про те, що для середньопотужних високошвидкісних приводів вдається досягти найкращого заповнення простору активними матеріалами.
- 3. Фізичні обмеження при високих потужностях:** При переході за межу 9–10 кВт спостерігається деградація питомих показників. Це зумовлено наступними чинниками:
 - **Механічна міцність:** Збільшення діаметра ротора при високих швидкостях вимагає значного потовщення утримуючих конструкцій (бандажів), що непропорційно збільшує масу ротора.
 - **Тепловий стан:** Конструкція із зовнішнім ротором ускладнює пряме відведення тепла від статора, який знаходиться всередині. При високих потужностях густина втрат зростає, що вимагає збільшення габаритів для розміщення систем охолодження.
 - **Магнітні втрати:** Висока частота перемагнічування призводить до зростання поверхневих втрат у ПМ та сталі, що знижує загальну ефективність системи.

Висновки. Встановлено, що для високошвидкісних синхронних двигунів із зовнішнім ротором існує оптимальний технологічний коридор потужності (7–9 кВт), у якому досягаються найкращі масогабаритні показники. Проведене дослідження дає змогу на етапі ескізного проектування обґрунтовано обирати номінальні параметри двигуна, мінімізуючи ризики надлишкової ваги та проблем з тепловиділенням.

ПОСИЛАННЯ

1. Kovalenko M.A., Tsyplenkov D.V., Kovalenko I.Ya., Titov E.O., Bazarov O.O Mathematical simulation of brushless high-speed permanent magnet motor. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 2025, № 4, 108–116. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2025-4/108>
2. Y. Titov, M. Kovalenko, I. Tkachuk, I. Kovalenko and O. Bazarov, "Using an Uninterrupted Power Supply to Reduce the Operating Costs of an Autonomous Electric Generator," 2025 IEEE 6th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek), Kharkiv, Ukraine, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/KhPIWeek61436.2025.11288689
3. Cheng M., Li Z., Xu S., Pei R. Design and calculation of multi-physical field of ultra-high-speed permanent magnet motor. *Energies*. 2024. Vol. 17, № 13. Article 3072.
4. Zhang M., Luo S., Liu X., Li W. The eddy current loss segmentation model of permanent magnet for temperature analysis in high-speed permanent magnet motor. *IET Power Electronics*. 2021. Vol. 14, № 4. P. 751–759.
5. Bi Q., Shao D. Loss analysis of high-speed permanent magnet motor for cordless vacuum cleaner. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023. Vol. 2488. Article 012021.

ЗАСТОСУВАННЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ МЕТОДОЛОГІЇ ВИЗНАЧЕННЯ ВАРТОСТІ НОВОГО ВВЕДЕННЯ ПОТУЖНОСТІ НА РИНКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

I. М. Буратинський

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (044) 294-67-01, e-mail: buratynskiy@ienergy.kiev.ua

Використання європейської методології визначення вартості нового введення потужності дає змогу розрахувати фіксовану плату відносно встановленої потужності, отримання якої для генеруючої установки та установки зберігання енергії на ринку електроенергії забезпечить інвестору повернення капітальних витрат та щорічних постійних витрат з відповідною нормою прибутку протягом визначеного періоду підтримки.

Ключові слова: вартість нового введення потужності, сонячна електростанція, вітрова електростанція, резервна електростанція, установка зберігання енергії.

APPLICATION OF THE EUROPEAN METHODOLOGY FOR DETERMINING THE COST OF NEW ENTRY ON THE ELECTRICITY MARKET IN UKRAINE

I. M. Buratynskiy

General Energy Institute of NAS of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (044) 294-67-01, e-mail: buratynskiy@ienergy.kiev.ua

Using the European methodology for determining the cost of new entry makes it possible to calculate a fixed fee relative to the installed capacity, the receipt of which for a generating plant and an energy storage system in the electricity market will provide the investor with a return on capital costs and annual fixed costs with an appropriate rate of return during a specified support period.

Key words: cost of new entry, solar power plant, wind power plant, reserve power plant, energy storage system.

ORCID: 0000-0003-2928-9621

У країнах ЄС відповідно до положень розділу IV Регламенту (ЄС) 2019/943 Європейського Парламенту та Ради від 05.06.2019 про внутрішній ринок електроенергії [1] функціонують механізми забезпечення потужності, рішення про застосування яких приймається за результатами оцінки достатності генеруючих потужностей для покриття прогнозованого попиту та забезпечення необхідного резерву.

На виконання положень Регламенту (ЄС) 2019/943 Агентством Європейського Союзу зі співробітництва регуляторів енергетики (ACER) затверджено методологію розрахунку вартості втраченого навантаження (VOLL, Value of Lost Load), вартості нового введення потужності (CONE, Cost of New Entry) та стандарту надійності (RS, Reliability Standard) (далі – методологія) [2]. Методологія спрямована на отримання реалістичних оцінок щодо визначення вартості нового введення потужності виходячи із готовності споживачів платити за втрачене навантаження. Однією із ключових задач методології є забезпечення сталого розвитку генеруючих потужностей, установок зберігання енергії та заходів з управління попитом на конкурентній ринковій основі при недискримінаційному доступі до ринку електричної енергії всіх типів генеруючих потужностей, установок зберігання енергії та механізмів реагування на попит.

Відповідно до методології передбачено визначення фіксованої (CONEfixed) та змінної (CONEvar) вартості нового введення потужності на ринку електричної енергії.

CONEfixed (у €/МВт-рік) визначається із урахуванням капітальних інвестиційних витрат та умовно-постійних витрат для всього циклу комерційної експлуатації електроустановки. При визначенні CONEfixed враховується також ступінь готовності електроустановки до запуску при наявності дефіциту електричної енергії в енергосистемі. Фактично величина фіксованого CONE дозволяє визначити необхідну величину повернення коштів для інвестора з прив'язкою до встановленої потужності енергогенеруючого обладнання.

CONEvar (у €/МВт·год) визначається із урахування змінних операційних витрат (паливної складової, плати за викиди тощо). Слід зауважити, що через значне коливання ринкових цін на викопне паливо, зокрема природний газ, що використовується на маневрених електростанціях, при прогнозуванні на середньострокову перспективу можливі значні відхилення прогнозу витрат на паливну складову від фактично понесених витрат. В результаті величина змінного CONEvar може не покрити ринкову діяльність електрогенеруючого підприємства, або навпаки забезпечити надприбуток, що у свою чергу призведе до збільшення витрат на підтримку нової генеруючої потужності.

Таким чином, CONEfixed є більш прогнозованим на середньострокову перспективу, що дає можливість застосування його при проведенні аукціонів із закупівлі послуг за механізмами забезпечення потужності.

Згідно методології [2] CONEfixed визначається через відношення еквівалентної річної вартості (EAC, Equivalent Annual Cost) до коефіцієнта доступності технології (De-rating factor):

$$CONE_{fixed} = EAC/K_d, \quad (1)$$

де $CONE_{fixed}$ – фіксована вартість нового введення потужності, Євро/МВт; EAC – еквівалентна річна вартість, Євро/МВт; K_d – коефіцієнт доступності технології d.

Еквівалентна річна вартість визначається через суму капітальних інвестиційних витрат та умовно-постійних витрат протягом економічного терміну експлуатації із урахуванням анuitету [2]:

$$EAC = \left[\sum_{i=1}^X \frac{CC_i}{(1+WACC)^i} + \sum_{i=X+1}^{X+Y} \frac{AFC_i}{(1+WACC)^i} \right] \cdot \frac{WACC \cdot (1+WACC)^{X+Y}}{(1+WACC)^Y - 1}, \quad (2)$$

де i – кожен рік протягом періоду будівництва та експлуатації; X – тривалість будівництва, років; Y – тривалість економічного терміну експлуатації, років; CC_i – капітальні інвестиційні витрати для кожного року будівництва, Євро/МВт; AFC_i – щорічні умовно-постійні витрати протягом економічного терміну експлуатації, Євро/МВт; $WACC$ – середньозважена вартість капіталу (Weighted Average Cost of Capital), %.

Як вхідні дані для розрахунку прийнято коефіцієнт доступності технологій для вітрової (BEC), сонячної (SEC), резервної електростанції (PEC) та установки зберігання енергії (УЗЕ) на рівні 0,95. Капітальні інвестиційні витрати (CAPEX) прийнято для BEC – 1300 \$/кВт, SEC – 700 \$/кВт, PEC – 700 \$/кВт, УЗЕ – 80 \$/кВт та 385 \$/кВт·год; щорічні умовно-постійні витрати протягом економічного терміну експлуатації для BEC – 25 \$/кВт·рік, SEC – 12 \$/кВт·рік, PEC – 7 \$/кВт·рік та УЗЕ – 6,9 \$/кВт·рік. Виходячи із облікової ставки НБУ на рівні 15,0% розрахована WACC становить – 12,5%, поточне значення анuitету – 15,5%. Результати визначення вартості нового введення потужності та орієнтовний термін повернення капітальних інвестиційних витрат для BEC, SEC, PEC та УЗЕ наведено у таблиці.

Таблиця. Результати визначення вартості нового введення потужності для BEC, SEC, PEC та УЗЕ

Найменування	BEC	SEC	PEC	УЗЕ
Встановлена потужність, МВт	4,0	4,0	4,0	4,0
Капітальні інвестиційні витрати (CAPEX), тис. €/МВт	1 393,5	914,3	787,6	1 135,2
Щорічні умовно-постійні витрати, €/МВт	22 145,6	10 629,9	6 200,8	16 670,0
Щорічні умовно-постійні витрати дисконтовані, €/МВт	180 409,7	86 596,7	50 514,7	135 802,9
Еквівалентна річна вартість (EAC), €/МВт·рік	244 526,3	155 499,5	130 214,3	197 466,4
Вартість нового введення потужності (CONEfix), €/МВт·рік	257 396,1	163 683,7	137 067,7	207 859,3
Термін повернення капітальних інвестиційних витрат, років	5,4	5,6	5,7	5,5

ПОСИЛАННЯ

1. REGULATION (EU) 2019/943 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 5 June 2019 on the internal market for electricity. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/943/oj/eng> (дата звернення: 15.03.2026).
2. ACER Decision on the Methodology for calculating the value of lost load, the cost of new entry, and the reliability standard. URL: https://acer.europa.eu/sites/default/files/documents/Decisions_annex/ACER%20Decision%2023-2020%20on%20VOLL%20CONE%20RS%20-%20Annex%20I.pdf (дата звернення: 15.03.2026).

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ТА МАНЕВРОВОСТІ ТЕЦ У КОМПЛЕКСНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМАХ З ВІДНОВЛЮВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

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

Зростання частки відновлюваних джерел енергії в сучасних енергосистемах призводить до підвищення вимог до гнучкості та маневровості традиційних генеруючих потужностей. У роботі проаналізовано технічні рішення, що дозволяють підвищити експлуатаційну гнучкість теплоелектроцентралей у комплексних енергосистемах, зокрема застосування парогазових і газопоршневих когенераційних установок, систем акумулювання теплової енергії, електричних котлів та теплових насосів. Показано, що комплексне впровадження цих технологій дозволяє розширити діапазон регулювання потужності, зменшити питомі витрати палива при часткових навантаженнях та підвищити ефективність роботи ТЕЦ у системах з високою часткою відновлюваних джерел енергії.

Ключові слова: теплоелектроцентрально, когенерація, маневровість, гнучкість енергосистеми, відновлювані джерела енергії, парогазова установка, газопоршнева установка, акумулювання теплової енергії..

TECHNICAL SOLUTIONS FOR ENHANCING THE FLEXIBILITY OF CHP PLANTS IN INTEGRATED ENERGY SYSTEMS WITH HIGH SHARES OF RENEWABLE ENERGY

Vitalii 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 increasing penetration of renewable energy sources in modern power systems significantly raises the requirements for operational flexibility of conventional generation units. This paper analyzes technical solutions aimed at improving the flexibility of combined heat and power (CHP) plants in integrated energy systems, including combined cycle units, gas engine cogeneration plants, thermal energy storage systems, electric boilers, and heat pumps. The study demonstrates that the integrated application of these technologies expands the power regulation range, reduces specific fuel consumption at partial loads, and improves the operational efficiency of CHP plants in energy systems with a high share of renewable energy sources.

Key words: combined heat and power plant, cogeneration, operational flexibility, renewable energy sources, combined cycle power plant, gas engine unit, thermal energy storage, integrated energy systems.

ORCID: 0000-0001-9128-9556

Зростання частки відновлюваних джерел енергії у сучасних енергетичних системах призводить до значних коливань генерації електроенергії та ускладнює балансування енергосистеми [1]. У таких умовах особливого значення набуває маневровість генеруючих потужностей, тобто здатність енергоблоків швидко змінювати режим роботи, регулювати навантаження та ефективно функціонувати у часткових режимах. Традиційні теплоелектроцентралі, що історично працювали переважно у базовому режимі, не завжди пристосовані до таких умов, що призводить до підвищення питомих витрат палива та зниження ефективності роботи обладнання.

У роботі проаналізовано основні технології комбінованого виробництва електричної та теплової енергії, що застосовуються на ТЕЦ: паротурбінні установки (ПТУ), парогазові установки (ПГУ) та газопоршнєві когенераційні установки (ГПУ). Паротурбінні блоки характеризуються високою надійністю та стабільністю роботи, проте мають значну інерційність і тривалий час пуску (6–10 годин із холодного стану) [2]. Парогазові установки, що працюють за комбінованим циклом Брейтона–Ренкіна, дозволяють досягати коефіцієнта корисної дії до 60 %, а також мають швидший запуск порівняно з паротурбінними блоками [3,4]. Разом із тим їх ефективність суттєво знижується при роботі на навантаженнях нижче 50 % номінальної потужності [5].

Таблиця 1 – Порівняння часу пуску та витрат палива для різних технологій ТЕЦ [6, 7]

Технологія (тип установки)	Час пуску з холод- ного стану, год	Час пуску з горя- чого стану, год	Швидкість набору потужності, %/хв	Питомі витрати палива на пуск, кг у.п./МВт
Паротурбінна (ПТУ)	6–10	1,5–3	1,0–1,5	25–40
Парогазова (ПГУ)	2–4	0,5–1,5	4–6	15–25
Газопоршнева (ГПУ)	0,05–0,25 (3–15 хв)	0,02–0,1 (1–6 хв)	8–15	5–10

Газопоршнєві установки характеризуються найвищою маневровістю серед розглянутих технологій: час холодного пуску становить 3–15 хв, швидкість набору потужності досягає 8–15 %/хв, а діапазон регулювання може становити приблизно 10–100 % від номінальної потужності [6]. Завдяки модульній структурі такі установки можуть працювати у складі мультиагрегатних конфігурацій, що дозволяє оперативно змінювати потужність станції шляхом підключення або відключення окремих модулів.

Важливим аспектом роботи ТЕЦ у маневрових режимах є економічність при часткових навантаженнях. При зниженні навантаження зростає частка постійних втрат (механічних, теплових та допоміжних), що призводить до збільшення питомих витрат палива [6]. Найбільш чутливими до цього є парогазові установки, тоді як модульні газопоршнєві системи дозволяють підтримувати відносно стабільну ефективність шляхом відключення окремих агрегатів [8].

Для підвищення маневровості ТЕЦ розглянуто низку технічних рішень. Одним із ключових є використання акумуляторів теплової енергії, які дозволяють розділити у часі виробництво та споживання тепла. Також ефективним рішенням є встановлення електричних котлів та теплових насосів, що дає можливість виробляти тепло незалежно від режиму роботи турбіни та використовувати надлишкову електроенергію в енергосистемі.

Таким чином, комплексне впровадження теплових акумуляторів, електричних котлів, теплових насосів та модульних когенераційних установок дозволяє суттєво підвищити маневровість ТЕЦ у комплексних енергосистемах. Поєднання цих технологій забезпечує розширення діапазону регулювання потужності, зменшення питомих витрат палива при часткових навантаженнях та підвищення ефективності роботи станцій у системах з високою частотою відновлюваних джерел енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Energy Technology Perspectives 2023 – Analysis. 2023 IEA, URL: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>, (дата звернення: 18, Квітень 2025).
2. Horskyi V. Технологічна енергоемність комбінованих циклів парогазових станцій. POWER ENGINEERING: economics, technique, ecology. 2022. № 3 URL: <http://energy.kpi.ua/article/view/272083>, (дата звернення: 27, Січень 2025).
3. Elwardany M., Nassib A. M., Mohamed H. A. Analyzing global research trends in combined cycle power plants: A bibliometric study. Energy Nexus. 2024. Вип. 13. С. 100265 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100265>.
4. Yucer C. T. Thermodynamic analysis of the part load performance for a small scale gas turbine jet engine by using exergy analysis method. Energy. 2016. Вип. 111. С. 251–259 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.108>.
5. Iliev I. K., Terziev A. K., Beloev H. I., Nikolaev I., Georgiev A. G. Comparative analysis of the energy efficiency of different types co-generators at large scales CHPs. Energy. 2021. Вип. 221. С. 119755 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119755>.
6. Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 172 Antonovycha str., Kyiv, 03150, Ukraine, Kobernik V. S. Fuel consumption of thermal power technologies under maneuvering modes. The Problems of General Energy. 2020. Вип. 2020, № 4. С. 45–49 DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2020.04.045>.
7. Li Y., Zhang G., Wang L., Yang Y. Part-load performance analysis of a combined cycle with intermediate recuperated gas turbine. Energy Conversion and Management. 2020. Вип. 205. С. 112346 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112346>.
8. Kou Y., Bie Z., Li G., Liu F., Jiang J. Reliability evaluation of multi-agent integrated energy systems with fully distributed communication. Energy. 2021. Вип. 224. С. 120123 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120123>.

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СВІТОВОЇ ЕНЕРГЕТИКИ, ВКЛЮЧНО З ВДЕ, ДО 2035 РОКУ

Б. І. Басок

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (050) 312-46-76, e-mail: borys.basok@gmail.com*

На основі світових інформаційних даних розглянуто поточний стан і ближні перспективи розвитку світової енергетики до 2035 року, включаючи геополітичну напруженість, тенденції зростання впливу ВДЕ та аспекти реалізації енергоефективності і оптимізацію кінцевого енергоспоживання.

Ключові слова: *світові політичні ризики, ВДЕ, енергоефективність, кінцеве енергоспоживання*

CURRENT STATUS AND TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF GLOBAL ENERGY, INCLUDING RENEWABLE SOURCES, UNTIL 2035

B. I. Basok

*Institute of Engineering Thermophysics National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (050) 312-46-76, e-mail: borys.basok@gmail.com*

Based on global information data, the current state and near-term prospects for the development of the global energy sector until 2035 are considered, including geopolitical tensions, trends in the growth of the influence of renewable energy sources, and aspects of implementing energy efficiency and optimizing final energy consumption.

Key words: *global political risks, renewable energy, energy efficiency, final energy consumption.*

ORCID: [0000-0002-8935-4248](https://orcid.org/0000-0002-8935-4248)

Деякі з основних тенденцій розвитку світової енергетики включають [1-4]:

Зміщення центрів енергетичної концентрації. Група країн, що розвиваються, на чолі з Індією та Південно-Східною Азією, до яких приєдналися країни Близького Сходу, Африки та Латинської Америки, починають дедалі більше формувати динаміку енергетичного ринку в найближчі роки, перейнявши естафету від Китаю.

Ризики для енергетичної безпеки зростають. Традиційні енергетичні ризики, що впливають на безпеку постачання нафти та газу, тепер супроводжуються вразливістю в інших сферах, найбільш помітно в ланцюгах поставок критично важливих мінералів, які стикаються з високим рівнем концентрації ринку. Також виявилася вразливість енергетичної інфраструктури до геополітичної\ нестабільності, військових конфліктів, кібератак, екстремальних погодних умов тощо.

Настає ера домінування електрики. Електроенергія є основою сучасної економіки, і попит на електроенергію зростатиме набагато швидше, ніж загальний обсяг енергії в найближчі роки. Ще одним ключовим питанням енергетичної безпеки буде швидкість впровадження нових мереж, накопичувачів та інших джерел гнучкості енергосистеми. Особливо важливим стає виробництво електроенергії із ВДЕ.

Сонячна енергетика стрімко розвивається. Сонячні фотоелектричні системи є найшвидше зростаючим джерелом електроенергії у світі – і це залишається так за будь-яких сценаріїв, причому переважна більшість зростання попиту на енергію протягом наступного десятиліття припадатиме на країни з високоякісними сонячними ресурсами. В 2025 році обсяги сонячної електроенергії перевищили обсяги вітрової електроенергетики.

Сповільнились темпи досягнення цілей щодо доступу до енергії та клімату. Енергетичний сектор повинен буде підготуватися до ризиків безпеки, спричинених підвищенням температур, але все ще є можливості уникнути найгірших кліматичних наслідків. WEO-2025 [1] також включає новий шлях досягнення загального доступу до електроенергії до 2035 року та чистого приготування їжі до 2040 року.

Нестабільність світових балансів нафти. Баланси нафтового ринку виглядають дедалі більш роздутими і нестабільними, а нові санкції підвищують ризики для поставок. Ці тенденції створюють роздуті ринкові баланси, оскільки обсяги нафти, що зберігається у/на воді, продовжують зростати. Водночас існують численні ризики для прогнозу, оскільки економічні наслідки нещодавньої тарифної кризи, воєнних дій, блокувань транспортних шляхів доставки та вплив нових санкцій на росію ще не стали повністю очевидними і дієвими.

Низькі темпи заміщення викопного палива. На сьогодні викопні палива, зокрема нафта та газ, продовжують домінувати в світовому енергетичному балансі, а рівень використання вугілля майже незмінний. Можливо це є причиною того факту, що на деяких територіях планети вже сьогодні середня температура зросла на 1,5 °C від доіндустріального рівня.

У всьому світі країни стикаються з нагальними загрозами енергетичній безпеці та зростаючими довгостроковими ризиками щодо безпрецедентного спектру палива, монополізму володіння критичними матеріалами для енергетики, нестабільністю поставок, непередбачуванності геополітичних змін і проявах прямого енергетичного шантажу.

У 2024 році в світі добавлено в експлуатацію 582 гігавати потужностей відновлюваної енергетики. Однак, згідно зі [5, 6] для досягнення глобальної мети Паризької угоди необхідно потроїти обсяги ВДЕ до 2030 року. Незважаючи на це зростання, поточні темпи не відповідають меті, поставленій на саміті ООН з питань зміни клімату COP28 у Дубаї, щодо збільшення глобальної потужності відновлюваної енергетики до 11,2 терават до кінця цього десятиліття. У [5, 6] показано, що для досягнення цієї мети потрібно додавати 1122 гігавати щорічно, тобто майже вдвічі більше, ніж в рекордному 2024 році.

Прогрес у сфері енергоефективності залишається надто повільним, стверджує IRENA, при цьому глобальна енергоемність зменшиться лише на 1% у 2024 році і на 1,8% у 2025 році, що значно нижче 4% щорічного покращення, необхідного для утримання глобального потепління в межах 1,5°C. Інший приклад, зростання енергоемності у 2025 році оцінюється понад 3% у Китаї і понад 4% в Індії, що значно перевищує середні показники. У США та ЄС, навпаки, прогрес у 2025 році впаде до нижче 1% після кількох років кращих результатів після енергетичної кризи. Близько двох третин світового кінцевого зростання попиту на енергію з 2019 року зосереджено в промисловості — секторі, де прогрес у енергоспоживанні різко сповільнився. Зростання попиту на електроенергію перевищило пропозицію відновлюваних джерел, що призвело до загального зростання менш ефективної генерації на викопному паливі. Попит на електроенергію зріс у два-три рази швидше, ніж загальний попит на енергію з 2019 року.

Глобальні інвестиції, пов'язані з енергоефективністю, досягнули майже 800 мільярдів доларів США у 2025 році, що більше на 6% порівняно з 2024 роком і більш ніж на 70% порівняно з 2015 роком. Однак у деяких країнах державні програми підтримки зменшилися через бюджетні обмеження, а витрати на матеріали також зросли. Наприклад, ціни на будівництво в Європейському Союзі зросли більш ніж на 20% з 2021 року. Географічні розбіжності в інвестиціях також залишаються: дві третини кінцевих інвестицій припадають на Китай, США та ЄС, тоді як найшвидше зростання за останні 10 років спостерігається в Індії та Південно-Східній Азії.

У звіті [5] серед причин зменшення темпів підвищення енергоефективності зазначено недостатні інвестиції, застарілі електромережі та обмеження в ланцюгах поставок, особливо критичних матеріалів. Інвестиції у відновлювані джерела енергії повинні зрости більш ніж удвічі — з 624 мільярдів доларів у 2024 році до щонайменше 1,4 трильйона доларів щорічно до 2030 року. IRENA закликає уряди до термінових дій по інтеграції цілей стосовно відновлюваної енергетики в національні плани щодо клімату напередодні COP30 у Бразилії. Країни G20, на які, за прогнозами, до 2030 року припадатиме понад 80% світових відновлюваних джерел енергії, повинні очолити це прискорення. Варто зазначити, що без зростання ефективності з 2010 року сьогоднішні викиди парникових газів були б на 20% вищими, а енергоефективність залишається одним із ключових чинників зниження викидів у майбутньому.

Напередодні COP30 понад 50 країн встановили оновлені цілі щодо енергоефективності у своїх Національно визначених внесках [6].

ПОСИЛАННЯ

1. World Energy Outlook 2025. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2025>
2. Energy Efficiency 2025. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025>
3. Reports. All Analysis - Analysis - IEA
4. Energy Efficiency Progress Tracker. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-efficiency-progress-tracker>

5. Renewable energy statistics 2025. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2025/Jul/IRENA_DAT_RE_Statistics_2025.pdf
6. Clean energy push accelerates but still falls short of global goals – and more top energy stories. <https://www.weforum.org/stories/2025/10/world-falling-short-on-key-renewables-target-and-other-latest-energy-news/>

Робота виконана за сприяння проєкту №2025.06/0054 Інституту технічної теплофізики НАН України «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

УДК 621.316.7

ВПЛИВ РЕЖИМІВ РОБОТИ СИСТЕМ НАКОПИЧЕННЯ ЕНЕРГІЇ НА НАПРУГУ МЕРЕЖІ З ВДЕ ПРИ ЗБУРЕННЯХ

А. А. Марченко¹, В. С. Карнаух²

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський проспект, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (099) 272-26-22, e-mail: vitkar19@gmail.com

У роботі досліджується вплив систем накопичення енергії (СНЕ) на стійкість роботи розподільної електричної мережі з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) в умовах критерію N-1. На базі модифікованої 14-вузлової схеми IEEE в середовищі DlgSILENT PowerFactory виконано моделювання перехідних процесів при відключенні критичної лінії та запропоновано методику комбінованого керування активною та реактивною потужністю СНЕ для ефективного регулювання напруги при збуреннях.

Ключові слова: системи накопичення енергії, критерій N-1, динамічна стійкість, реактивна потужність, розподілена генерація, відновлювані джерела енергії.

IMPACT OF BATERRY ENERGY STORAGE SYSTEM MODES ON VOLTAGE DURING EMERGENCY SCENARIOUS

A. Marchenko¹ V. Karnaukh²

National Technical University of Ukraine
"Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37, Prospect Beresteyskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (099) 272-26-22, e-mail: vitkar19@gmail.com

The paper investigates the impact of battery energy storage systems (BESS) on the stability of a distribution grid with renewable energy sources (RES) under N-1 criterion. Based on the modified IEEE 14-bus scheme, simulation of transient processes during the disconnection of a critical transmission line was performed in DlgSILENT PowerFactory. A coordinated active and reactive power control methodology for energy storage systems has been proposed for efficient voltage regulation.

Key words: energy storage systems, N-1 criterion, dynamic stability, reactive power, distributed generation, renewable energy sources.

ORCID: ¹0000-0003-2092-4107 ; ²0009-0007-3204-3901

Сучасна трансформація в електроенергетиці, що характеризується децентралізацією генерації та інтеграцією значних обсягів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), створює нові виклики для забезпечення надійності розподільних мереж. Традиційні підходи до планування мереж, засновані на пасивних елементах та надлишковості пропускної здатності ліній, стають економічно неефективними. Особливої гостроти набуває проблема забезпечення стійкості мережі при аварійних відключеннях (критерій N-1), коли втрата одного елемента може призвести до виходу напруги за допустимі межі або навіть до каскадних відключень. Актуальність роботи пояснюється збільшенням частки ВДЕ, підключених до розподільної мережі, що ускладнює керування режимами роботи мережі, особливо це стосується регулювання напруги. Роль реактивної потужності від інверторних джерел (Inverter Based Resources IBR), зокрема систем накопичення енергії (СНЕ), поступово зростає, проте поки що цей потенціал часто ігнорується або недооцінюється при проектуванні, обмежуючись лише функціями балансування активної потужності [1].

Метою роботи є експериментальна верифікація методу підвищення надійності розподільної мережі при аварійних відключеннях ліній шляхом координованого керування активною та реактивною потужностями СНЕ [4]. Моделювання виконувалось у програмному комплексі DlgSILENT PowerFactory 2026. В якості тестової моделі використано модифіковану схему IEEE 14-bus, адаптовану до класу напруги розподільної мережі 35-110 кВ (Рис.1).

Дослідження проводилось з використанням розрахунку динамічних перехідних процесів RMS Simulation (Root Mean Square). Для аналізу було обрано критичну подію N-1: аварійне відключення лінії електропередачі між вузлами 06 та 11. У вузлі 10 підключено систему накопичення енергії з номінальною повною потужністю інвертора $S_{nom}=6.7$ МВА.

У процесі дослідження виконано моделювання трьох режимів. Перший режим (без СНЕ) відображав відключення критичної лінії 6-11 без застосування СНЕ. Результати RMS-симуляції показали значне падіння напруги у вузлах, що залишилися живитися по резервних зв'язках. Зокрема, у вузлі 10 напруга впала до 0.87 в.о., а у вузлі 11 — до 0.84 в.о., що виходить за межі допустимих норм ($\pm 10\%$).

У другому режимі (СНЕ Р-режим) СНЕ у вузлі 10 було налаштовано на генерацію виключно активної потужності $P=6.7$ МВт ($Q=0$), що відповідає класичному підходу використання накопичувачів для зрізання піків (peak shaving) або емуляції віртуальної лінії. Результати показали певне покращення: напруга у вузлі 11 піднялася до 0.88 в.о., що все ще залишається нижче критичного порогу 0.9 в.о. Це пояснюється тим, що в розподільних мережах значний вплив на падіння напруги має реактивна складова струму через індуктивний опір ліній. Генерація лише активної потужності не здатна компенсувати втрати напруги на реактивному опорі довгих обхідних ліній.

У третьому режимі (СНЕ PQ-режим) було змінено стратегію керування інвертором СНЕ на режим контролю напруги (Voltage Control / V-mode). При цьому активна потужність була обмежена на рівні $P=6.0$ МВт, а доступний резерв реактивної потужності інвертора ($Q_{max} \approx 3$ МВар) використовувався системою автоматичного регулювання для підтримки напруги. Симуляція показала, що завдяки такому координованому керуванню напруга у всіх вузлах мережі увійшла в допустимі межі. У найбільш критичному вузлі 11 напруга відновилася до рівня 0.90 в.о., а у вузлі 10 — до 0.98 в.о. Результати моделювання трьох режимів роботи СНЕ зображені на Рис.1

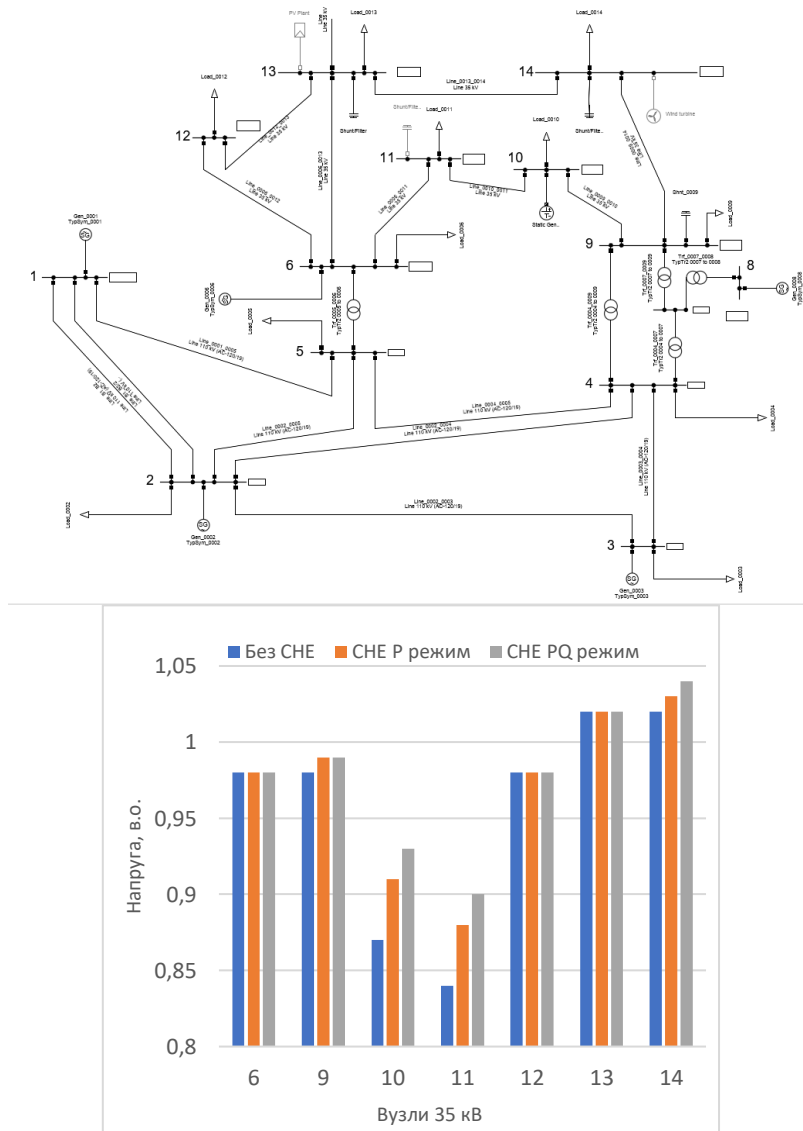


Рис. 1. Схема та результати моделювання режимів роботи мережі

Таким чином отримані результати підтверджують, що пріоритетне використання СНЕ для балансування активної потужності може бути успішно доповнене функцією регулювання напруги за рахунок зміни стратегії керування інвертора. Це дозволить забезпечити стійкість системи без необхідності встановлення додаткових пристроїв компенсації реактивної потужності (ПКРП), що позитивно впливає на економічні показники інвестиційних проєктів. В подальших дослідженнях планується розробка алгоритму координованого керування активною та реактивною потужностями СНЕ разом із джерелами ВДЕ та пристроями ПКРП для ефективного балансування потужності та регулювання напруги мережі.

ПОСИЛАННЯ

1. Saboori H., Pishbahar H., Dehghan S. et al. Reactive Power Implications of Penetrating Inverter-Based Renewable and Storage Resources in Future Grids Toward Energy Transition — A Review. *Proceedings of the IEEE*. 2025. P. 1–39. DOI: 10.1109/JPROC.2025.3555509. (Дата звернення: 05.03.2026 р).
2. Wang W., He W., Cheng J. et al. Active and reactive power coordinated control strategy of battery energy storage system in active distribution network. *2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*. Beijing, China. 2017. P. 1–6. DOI: 10.1109/EI2.2017.8245462. (Дата звернення: 06.03.2026 р).

ВІРТУАЛЬНА ІНЕРЦІЯ ТА VPP-КООРДИНАЦІЯ В КОМБІНОВАНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

Хомутов С. В.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
phone: (050) 3857056, e-mail: sergii.khomutov@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0000-4067-7671>

Анотація. Актуальність дослідження визначалась інерційним дефіцитом та зростанням технологічних конфліктів в інвертор-домінованих енергосистемах. Локальні рішення на основі *grid-forming/Virtual Synchronous Machine (GFM/VSM)* покращують окремі динамічні показники, однак не забезпечують системної узгодженості режимів без надрівневої координації. Метою дослідження є кількісне обґрунтування віртуальної інерції як системного інструмента підвищення частотно-фазової стійкості комбінованих електропостачальних систем шляхом координації VSM та Virtual Power Plant (VPP). Методологія базується на поєднанні *simulation-based* моделювання, *scenario-driven* експериментального дизайну, параметричного аналізу VSM та координаційного системного моделювання VPP зі стохастичною варіативністю профілів ВДЕ/навантаження і статистичною агрегацією метрик. Узагальнення результатів показало: VSM забезпечує зниження RoCoF та покращення *frequency nadir* (40–60% у середньому), але без координації зберігає частотно-фазову варіативність і режимні конфлікти; інтеграція VSM+VPP скорочує технологічні конфлікти на 30–40%, зменшує пікові динамічні ризики на 70–80% та підвищує успішність ресинхронізації до ~95%. Отримані кількісні оцінки можуть бути безпосередньо використані при плануванні мікромереж, VPP-платформ і критичної інфраструктури з високою часткою ВДЕ.

Ключові слова: віртуальна інерція, *grid-forming* (мережеформувальні) інвертори, Virtual Power Plant, динамічна стійкість, інерційно-дефіцитні енергосистеми, координаційне керування, комбіновані системи електропостачання

VIRTUAL INERTIA AND VPP -COORDINATION IN HYBRID POWER SUPPLY SYSTEMS

S. V. 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
<https://orcid.org/0009-0000-4067-7671>

Abstract. The relevance of the study is determined by the inertia deficit and the growing number of technological conflicts in inverter-dominated power systems. Local solutions based on *grid-forming / Virtual Synchronous Machine (GFM/VSM)* technologies improve certain dynamic indicators; however, they do not ensure system-level coordination of operating regimes without higher-level control and coordination mechanisms. The objective of the study is to provide a quantitative justification of virtual inertia as a system-level instrument for enhancing frequency-phase stability of combined power supply systems through the coordinated operation of Virtual Synchronous Machines (VSM) and Virtual Power Plants (VPP). The methodology is based on a combination of simulation-based modeling, scenario-driven experimental design, parametric analysis of VSM, and coordinated system-level modeling of VPP with stochastic variability of renewable energy (ВДЕ – renewable energy sources) generation/load profiles and statistical aggregation of performance metrics. The generalization of the results demonstrates that VSM reduces the rate of change of frequency (RoCoF) and improves the frequency nadir (by 40–60% on average); however, without coordination it retains frequency-phase variability and operational conflicts. The integration of VSM with VPP reduces

technological conflicts by 30–40%, decreases peak dynamic risks by 70–80%, and increases the resynchronization success rate to approximately 95%. The obtained quantitative estimates can be directly applied in the planning and design of microgrids, VPP platforms, and critical infrastructure with a high share of renewable energy sources (ВДЕ).

Keywords: virtual inertia, grid-forming inverters, Virtual Power Plant, dynamic stability, inertial-deficit power systems, coordination control, combined power supply systems.

ORCID: 0009-0000-4067-7671.

Використані скорочення

GFM-Grid-Forming (мережеформувальний режим роботи інвертора)

GFL-Grid-Following (мережеслідуювальний режим роботи інвертора)

VSM- Virtual Synchronous Machine (віртуальна синхронна машина)

VPP- Virtual Power Plant (віртуальна електростанція)

ВДЕ- відновлювані джерела енергії

RoCoF- Rate of Change of Frequency (швидкість зміни частоти, df/dt)

SoC - State of Charge (ступінь/стан зарядженості накопичувача)

BESS- Battery Energy Storage System (система накопичення енергії на акумуляторах)

VOC- Virtual Oscillator Control (керування на основі віртуального осцилятора)

VSG- Virtual Synchronous Generator (віртуальний синхронний генератор)

FRT- Fault Ride-Through (стійкість/здатність не відключатися при аварійних провалах напруги)

TOV- Temporary Overvoltage (тимчасове перенапруження)

SCR — Short Circuit Ratio (коефіцієнт короткого замикання)

Постановка проблеми.

У системах із високою часткою інверторно-приєднаних ресурсів (IBR) істотно зменшується еквівалентна інерція. Це призводить до збільшення RoCoF та поглиблення frequency nadir після дисбалансів потужності, що ускладнює роботу первинного регулювання частоти, підвищує чутливість до слабких мереж та формує технологічні конфлікти. Конфлікти виникають через суперечність локальних контурів керування ($f/V/P/Q$) із системними обмеженнями (ліміти струму/потужності інверторів, обмеження SoC BESS, пріоритети режимів VPP).

Мета та новизна.

Метою роботи є кількісне обґрунтування ефективності віртуальної інерції лише за умови її інтеграції з VPP-координацією. Новизна полягає у використанні інтегрального Conflict Index/Rate для опису режимної конфліктності та у порівняльній оцінці Baseline, VSM і VSM+VPP за частотними, фазовими та енергетичними метриками у множині сценаріїв.

Методологія та метрики.

Дослідження виконано як scenario-driven simulation: (i) множина профілів ВДЕ/навантаження (стохастична варіативність), (ii) набір перехідних подій (дисбаланс потужності, перемикавання режимів, ресинхронізація), (iii) параметричний аналіз VSM і правила VPP-координації. Метрики: RoCoF, frequency nadir, settling time, фазове узгодження $\Delta\theta$, показники SoC/насичення BESS та Conflict Index/Rate.

Результати.

Узагальнено: VSM покращує частотні метрики (40–60% у середньому), але без координації зберігається підвищена конфліктність. VSM+VPP зменшує конфлікти на 30–40%, знижує пікові динамічні ризики на 70–80% та підвищує успішність ресинхронізації до $\approx 95\%$. Графік “Stage 1 (Baseline): Frequency Response” (Помилка! Джерело посилання не знайдено.1) зафіксував глибокий частотний nadir у режимі islanding (~ 48.1 – 48.3 Hz), що відповідало відхиленню понад 3.5% від номіналу, та подовжений settling time, який у режимах islanding і resynchronization перевищував значення нормального режиму на 40–60%. Навіть за resynchronization відновлення частоти відбувалося повільно та з додатковими транзиторними збуреннями, що свідчило про обмежену регуляторну спроможність GFL-інверторів.

Результати “Stage 3: Frequency Response with and without VPP Coordination” (Помилка! Джерело посилання не знайдено.2) засвідчили, що інтеграція Virtual Power Plant як координаційного надрівня зменшувала амплітуду частотних відхилень на 35–50% порівняно з режимом VSM-only під час load step, islanding та resynchronization.

Частотна дисперсія знизилася більш ніж удвічі, що вказувало на ефективне згладжування стохастичних та подієвих збурень за рахунок узгодженого dispatch накопичувачів і керування навантаженням).

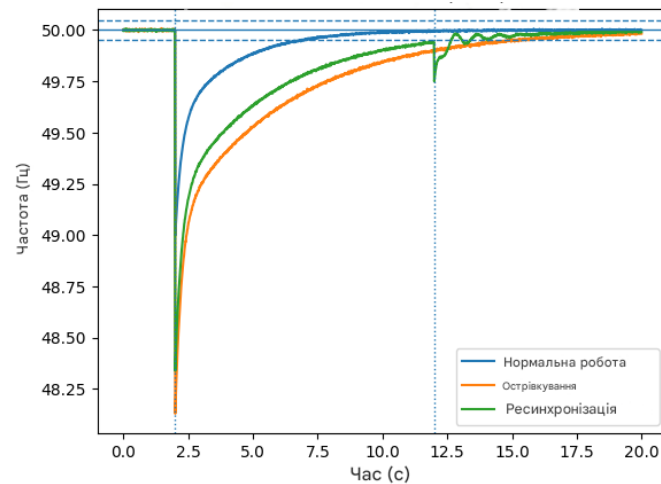


Рис. 1. Етап 1 (базова конфігурація): частотна характеристика
Fig. 1. Stage 1 (basic configuration): frequency response

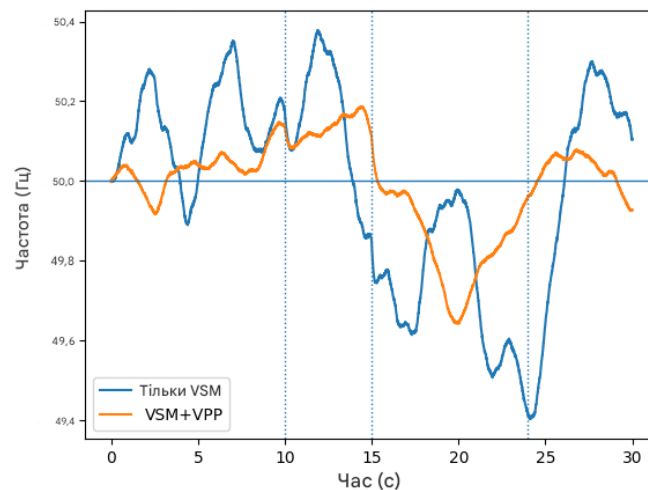


Рис. 2. Етап 3: частотна характеристика з координацією VPP та без неї
Fig. 2. Stage 3: Frequency response with and without VPP coordination

Схему (Рис. 3. Архітектура Virtual Power Plant та канали обміну даними з локальними контурами керування інвертор-орієнтованих ресурсів

Fig. 3. Virtual Power Plant architecture and data exchange channels with local control loops of inverter-oriented resources

З) було сформовано для формалізації координаційної архітектури багаторівневого керування, у якій VPP-контролер виконував функції централізованої оптимізації, синхронізації частоти та диспетчеризації. Відображено ключові інформаційні потоки: вимірювання потужності (P , Q), референс-сигнали (V^* , f^* , P^* , Q^*), часові мітки синхронізації (T_{synch} , ΔT) та сигнали перемикання режимів.



Рис. 3. Архітектура Virtual Power Plant та канали обміну даними з локальними контурами керування інвертор-орієнтованих ресурсів

Fig. 3. Virtual Power Plant architecture and data exchange channels with local control loops of inverter-oriented resources

Для узагальнення впливу віртуальної інерції та координаційного керування було сформовано порівняльну таблицю (Таблиця 1), що відображає ключові метрики стабільності та масштаби їх покращення на кожному етапі дослідження..

Таблиця 1. Компаративний аналіз результатів дослідження

Table 1. Comparative analysis of research results

Метрика	Baseline	VSM-only	VSM+VPP
Peak RoCoF reduction	0%	≈50–60%	≈75–80%
Frequency nadir improvement	0%	≈40–50%	≈65–75%
Settling time reduction	0%	≈35–45%	≈60–70%
Phase error reduction	0%	≈45–55%	≈70–80%
Conflict rate reduction	0%	≈30–40%	≈70–75%
Resynchronization success rate	≈60%	≈80–85%	≈95%

Висновки.

1) VSM ефективно покращує частотну динаміку (RoCoF, nadir), але без координації може залишатися режимна конфліктність. 2) VSM+VPP забезпечує системну узгодженість режимів і ресурсів, знижуючи пікові ризики та підвищуючи успішність ресинхронізації. 3) Отримані підходи корисні для проектування VPP-архітектур, мікромереж і критичної інфраструктури з високою часткою ВДЕ та BESS.

ПОСИЛАННЯ

1. Dörfler F., Groß D. Control of low-inertia power systems. Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems, 2022.
2. Anttila S., Döhler J. S., Oliveira J. G., Boström C. Grid forming inverters: A review... Energies, 2022.
3. Zhang H. et al. Grid forming converters in renewable energy sources dominated power grid... Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021.
4. IEEE Std 1547-2018. IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power System Interfaces.
5. ENTSO-E / CIGRE technical reports on grid-forming converters and stability in inverter-dominated systems

УДК 621.311

КОНЦЕПТУАЛЬНІ ЗАСАДИ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ ТЕХНОЛОГІЙ SMART GRID

О. А. Мельник¹, М. П. Журнаджі²

КПІ ім. Ігоря Сікорського,
Берестейський проспект, 37, корпус 20, 03056, м. Київ, Україна
тел.: (068) 623-74-35, e-mail: melnyk.oleksandr@ill.kpi.ua

У роботі проаналізовано концепцію розумних електричних мереж (Smart Grid) як інструмент підвищення надійності та енергоефективності енергосистеми. Досліджено вплив цифрових підстанцій, систем накопичення енергії та розподіленої генерації на інтеграцію відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та зниження аварійності. Обґрунтовано роль децентралізації у забезпеченні стійкості інфраструктури в умовах воєнного стану та післявоєнної відбудови.

Ключові слова: Smart Grid, енергетична стійкість, цифрові підстанції, відновлювані джерела енергії, розподілена генерація.

CONCEPTUAL PRINCIPLES OF MODERNIZATION OF THE UKRAINIAN POWER SYSTEM BASED ON SMART GRID TECHNOLOGIES

O. A. Melnyk¹, M. P. Zurnadzhі²

Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute,
37 Beresteysky prospect, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (068) 623-74-35, e-mail: melnyk.oleksandr@ill.kpi.ua

The paper analyzes the concept of smart grids (Smart Grid) as a tool for increasing the reliability and energy efficiency of the power system. The impact of digital substations, energy storage systems and distributed generation on the integration of renewable energy sources (RES) and reducing the accident rate is studied. The role of decentralization in ensuring the stability of infrastructure in conditions of martial law and post-war reconstruction is substantiated.

Key words: Smart Grid, energy sustainability, digital substations, renewable energy sources, distributed generation.

ORCID: ¹0000-0003-2894-3476; ²0009-0007-2620-5732.

Традиційна модель електропостачання, що базується на односторонніх потоках енергії, не забезпечує необхідного рівня гнучкості в умовах сучасних викликів. Трансформація енергетичного сектору України вимагає переходу до концепції Smart Grid, яка передбачає інтеграцію цифрових технологій та двосторонній обмін інформацією між суб'єктами ринку.

Розподілений характер технологій відновлюваної енергетики може допомогти підвищити стійкість громади до екстремальних погодних умов, політичної нестабільності та інших несподіваних подій. Особливо такі задачі загострюються в умовах воєнних дій та післявоєнної відбудови.

В умовах воєнного стану розвиток ВДЕ перетворюється з екологічного питання на критичний чинник національної безпеки. Розподілена (децентралізована) генерація на основі ВДЕ підвищує живучість системи: малі об'єкти ВДЕ менш вразливі до масованих атак порівняно з великими тепловими електростанціями. Це дозволяє підтримувати автономну роботу об'єктів критичної інфраструктури та підвищує енергетичну стійкість громад до екстремальних умов.

Післявоєнна відбудова України має відбуватися за принципом «Build Back Better» (відбудувати краще, ніж було). Це передбачає повну модернізацію енергетичного сектору через інтеграцію інтелектуальних мереж (Smart Grids), мікромереж (Microgrids), ВДЕ та систем накопичення енергії (BESS). Мікромережі здатні функціонувати в «острівному» режимі (island mode), що є вирішальним для забезпечення енергоживлення локальних об'єктів у разі пошкодження магістральних ліній передачі. Такий підхід не лише зміцнить енергонезалежність, а й дозволить

Україні відповідати вимогам Європейського зеленого курсу, що є необхідною умовою для повноцінної інтеграції в ЄС.

Статистичні дані останніх років вказують на значний обсяг невеликих приватних електростанцій, переважно сонячних – так, загальна потужність розосереджених СЕС у 2024 році в світі зросла на 220 ГВт [1]. Це досить значна кількість, враховуючи обмежену (до 30 кВт) одиничну встановлену потужність. Й це підтверджує глобальний тренд до децентралізації, де споживач стає активним учасником балансування системи.

Сучасна енергосистема України функціонує в умовах підвищених ризиків, пов'язаних із пошкодженням інфраструктури, зростанням частки відновлюваних джерел енергії та необхідністю підвищення кіберзахисту енергетичних об'єктів [2]. Традиційна модель електропостачання, що базується на односторонньому потоці енергії та низькому рівні автоматизації, не забезпечує достатнього рівня гнучкості та надійності [2, 4].

Концепція Smart Grid передбачає інтеграцію цифрових технологій, автоматизованих систем керування та двостороннього обміну інформацією між усіма учасниками ринку електроенергії [2].

Основними елементами такої розумної мережі є [2, 3, 4]:

1. розумні лічильники (smart meters) - забезпечують облік у реальному часі та управління попитом (Demand Response);
2. системи SCADA/EMS /ADMS - інтегровані платформи для управління розподільчими мережами;
3. цифрові підстанції, що функціонують за стандартом IEC 61850 - дозволяють мінімізувати використання мідних кабелів та підвищити швидкість спрацювання релейного захисту ;
4. датчики моніторингу режимів роботи - забезпечують моніторинг динамічної стійкості мережі;
5. системи накопичення енергії (BESS) - нівелюють стохастичний характер генерації ВДЕ, забезпечуючи стабільність частоти та напруги.

Впровадження Smart Grid забезпечує скорочення показників SAIDI (індекс середньої тривалості перерв у електропостачанні) та SAIFI (індекс середньої частоти перерв), зменшення технічних втрат електроенергії, підвищення ефективності балансування системи та створення умов для інтеграції розподіленої генерації (ВДЕ) [3, 4]. Особливо важливим є застосування технологій Self-healing (самовідновлення), що дозволяють автоматично локалізувати аварійні ділянки та здійснювати перепідключення споживачів альтернативними маршрутами живлення за мілісекунди без участі персоналу [2].

Для міської інфраструктури розумні мережі створюють передумови розвитку електротранспорту (V2G (Vehicle-to-Grid), де електромобілі виступають як мобільні накопичувачі енергії), мікромереж та дахових сонячних електростанцій [3, 4]. Споживач переходить від пасивної ролі до активної, стаючи «просюмером» — одночасно виробником і споживачем електроенергії, що вимагає впровадження нових ринкових механізмів, таких як P2P-торгівля (peer-to-peer) електроенергією [3,4].

Отже, в умовах воєнного стану та подальшого відновлення енергетичної інфраструктури технології Smart Grid розглядаються як стратегічний напрям модернізації енергосистеми України. Реалізація цифрової трансформації мереж дозволить створити адаптивну, кіберзахищену та низьковуглецеву енергосистему, що відповідає викликам XXI століття та інтеграційним прагненням України [2, 3, 4].

ПОСИЛАННЯ

1. Renewables2025 Global Status Report. ISBN 978-3-948393-19-9. – 84 p. URL: <https://www.ren21.net/gsr-2025>
2. Jady Powell, Alex McCafferty-Leroux, Waleed Hilal, S. Andrew Gadsden, Smart grids: A comprehensive survey of challenges, industry applications, and future trends, Energy Reports, Volume 11, 2024, Pages 5760-5785, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.05.051>
3. Muhammad Khalid, Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges, Energy Strategy Reviews, Volume 51, 2024, 101299, ISSN 2211-467X, <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101299>
4. Kiasari, M.; Ghaffari, M.; Aly, H.H. A Comprehensive Review of the Current Status of Smart Grid Technologies for Renewable Energies Integration and Future Trends: The Role of Machine Learning and Energy Storage Systems. Energies 2024, 17, 4128. <https://doi.org/10.3390/en17164128>

УДК 621.311.25

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ТИПУ NARX ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ПОГОДНИХ ПОКАЗНИКІВ НА ПРИКЛАДІ МІСТА ОДЕСИ

М. Д. Сильнягін, В. Г. Побочій

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
e-mail: msylniahin@gmail.com, v.pobochiy@gmail.com

Досліджено застосування рекурентної нейронної мережі типу NARX (Nonlinear AutoRegressive with Exogenous inputs) для прогнозування температури зовнішнього повітря в місті Одеса. Для навчання та тестування моделі використано масив метеорологічних даних за 2013–2025 роки (понад 109 000 погодинних спостережень). Набір вхідних параметрів включав температуру, вологість, точку роси та атмосферний тиск. Досліджено моделі з горизонтами прогнозування від 1 до 24 годин. RMSE прогнозу варіюється від 0,16 °C до 1,69 °C. Показано перспективність NARX для планування накопичення сонячної енергії.

Ключові слова: NARX, штучна нейронна мережа, прогнозування температури, часові ряди, сонячна енергія.

APPLICATION OF A NARX-TYPE NEURAL NETWORK FOR FORECASTING WEATHER PARAMETERS USING THE CITY OF ODESSA AS AN EXAMPLE

M. Sylniahin V. Pobochii

Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine,
2a Mariyi Kapnist str., Kyiv, 03057, Ukraine,
e-mail: msylniahin@gmail.com, v.pobochiy@gmail.com

The application of a recurrent neural network of the NARX type (Nonlinear AutoRegressive with Exogenous inputs) for outdoor air temperature forecasting in the city of Odesa is investigated. A meteorological dataset from 2013–2025 (over 109,000 hourly observations) was used for training and testing the model. The input parameters included temperature, humidity, dew point and barometric pressure. Models with prediction horizons from 1 to 24 hours were studied. The forecast RMSE ranges from 0.16 °C to 1.69 °C. The prospects of NARX for solar energy storage planning are demonstrated.

Key words: NARX, artificial neural network, temperature forecasting, time series, solar energy.

ORCID: 0009-0001-7826-5776, 0009-0008-0504-3591

Прогнозування погодних показників є важливою задачею для енергетики, зокрема для систем накопичення сонячної енергії, де точний прогноз температури та сонячної радіації є критичним фактором ефективного планування зарядки та розрядки акумуляторних батарей. Штучні нейронні мережі (ШНМ) стали ефективним інструментом прогнозування часових рядів завдяки здатності виявляти складні нелінійні залежності без явного математичного опису фізичних процесів [1, 2]. Серед різних архітектур особливе місце займають мережі типу NARX (Nonlinear AutoRegressive with Exogenous inputs) — нелінійне узагальнення класичної авторегресійної моделі з екзогенними входами, що використовує затримані значення входів та виходів [3, 4]. Перевагою NARX є вбудована пам'ять, яка забезпечує коротші шляхи для розповсюдження градієнтної інформації та зменшує чутливість до проблеми зникаючих градієнтів.

Метою роботи є дослідження ефективності нейронної мережі типу NARX для прогнозування температури зовнішнього повітря в місті Одеса на горизонтах від 1 до 24 годин з перспективою використання результатів для оптимального управління системами накопичення сонячної енергії.

Для навчання та тестування мережі використано масив метеорологічних даних м. Одеса за період з 01.01.2013 по 04.09.2025 (109 763 погодинних спостережень). Набір вхідних параметрів: температура повітря (від –17,1 до

39,0 °C), вологість (0–99%), точка роси та атмосферний тиск. Додатково використано часові ознаки (година, день тижня, місяць). Загалом 9 екзогенних входів. Дані нормалізовано методом min-max, масив розділено хронологічно: 80% навчання, 10% валідація, 10% тестування. Прогалини у вимірюваннях (2,6%) не заповнювались інтерполяцією.

Мережа NARX реалізована мовою *Go* з оптимізатором *Adam* та функцією активації *tanh*. Для кожного горизонту (1, 3, 6, 12, 24 год) створено окрему конфігурацію. Застосовано метод навчання з учителем (teacher forcing) із адаптивною стратегією *performance_gated* та *dropout*-регуляризацию (0,1–0,5). Результати навчання та тестування моделей наведено в таблиці.

Таблиця. Результати моделей NARX для різних горизонтів прогнозування

Горизонт	Шари	Затримки	Епохи	MSE train	MSE val	RMSE, °C	Overfit
1 год	32-16	1, 2	350	2.70e-6	7.90e-6	0.16	2.94
3 год	32-16	1, 2, 3	350	1.50e-4	2.75e-4	0.93	1.83
6 год	48-24	1, 2, 3, 6	350	4.08e-4	2.87e-4	0.95	0.70
6 год*	48-24-12	1, 2, 3, 6	500	3.97e-4	6.23e-4	1.40	1.57
12 год	64-32	1,2,3,6,12	500	7.15e-4	5.28e-4	1.29	0.74
12 год*	96-48	1..12	500	7.13e-4	1.28e-3	2.01	1.80
24 год	64-32	1,2,3,6,12,24	500	1.13e-3	9.08e-4	1.69	0.80
24 год*	64-32	1,2,3,6,12,24	500	1.14e-3	9.93e-4	1.77	0.87

Аналіз результатів показує чітку тенденцію: зі збільшенням горизонту прогнозування RMSE зростає від 0,16 °C (1 год) до 1,69 °C (24 год). Для горизонту 6 годин простіша архітектура (48-24 нейрони) виявилась ефективнішою за глибшу (48-24-12) з overfit ratio 0,70 проти 1,57. Для горизонту 12 годин розріджені затримки [1, 2, 3, 6, 12] забезпечили результат, порівнянний з повним набором [1..12], при значно менших обчислювальних витратах (30 хв проти 1,5 год). Dropout-регуляризація зі значеннями 0,25–0,5 забезпечила overfit ratio менше 1,0 для довших горизонтів.

Prediction vs Target (Autonomous Mode)

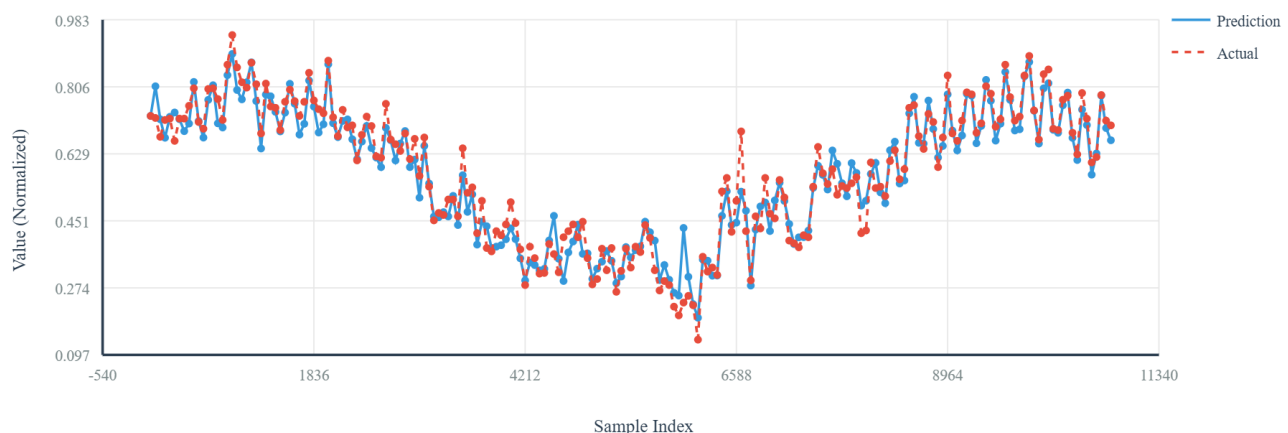


Рисунок 1 — Порівняння фактичних та прогнозованих температур для горизонту в 24 години

Навчання на даних з природними прогалинами (2,6%) не погіршило якість прогнозу, а сформувало більш стійку модель, наближену до реальних умов експлуатації. Мережа NARX, завдяки здатності враховувати часову динаміку та екзогенні фактори, є перспективною для задач планування накопичення сонячної енергії: прогноз температури на 6–24 год наперед, у поєднанні з прогнозом сонячної радіації, дозволяє оптимізувати стратегію зарядки/розрядки акумуляторів, знижувати навантаження на мережу у пікові години та максимізувати використання генерованої електроенергії.

Робота виконана за сприяння проєкту №2025.06/0054 Інституту технічної теплофізики НАН України «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

ПОСИЛАННЯ

1. Басок Б.І., Божко І.К., та ін. Застосування штучної нейронної мережі для прогнозування теплового стану повітряно-ґрунтового теплообмінника. Промислова теплотехніка, 2024.
2. Kumar R., Kaushik S.C., Garg S.N. Heating and cooling potential of an earth-to-air heat exchanger using artificial neural network. Renewable Energy, 2006, Vol. 31, Issue 8, pp. 1139–1155.
3. Lin T., Giles C.L., Horne B.G., Kung S.Y. A Delay Damage Model Selection Algorithm for NARX Neural Networks. University of Maryland, CS-TR-3707.
4. Narendra K.S., Parthasarathy K. Identification and control of dynamical systems using neural networks. IEEE Trans. Neural Networks, 1990, Vol. 1, No. 1, pp. 4–27.
5. Kingma D.P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. arXiv:1412.6980, 2014.

УДК 621.3.051

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МОНІТОРИНГ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ В MICROGRID З ВИКОРИСТАННЯМ SMART GRID ТА ІОТ-ТЕХНОЛОГІЙ

О. В. Окушко, І. П. Радько, В. А. Наливайко

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 сучасні підходи до побудови інтелектуальних систем моніторингу та прогнозування електроспоживання в умовах впровадження концепції Microgrid. Запропоновано архітектуру системи, що базується на використанні Smart Grid та IoT-технологій, а також розроблено лабораторний зразок для дослідження енергоефективності електроспоживачів. Показано можливість застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування навантаження та оптимізації режимів роботи енергосистеми.

Ключові слова: інтелектуальні системи, електротехнічне обладнання, моніторинг, прогнозування, низьковольтні мережі, енергоефективність

INTELLIGENT MONITORING AND FORECASTING OF ELECTRICITY CONSUMPTION IN MICROGRIDS USING SMART GRID AND IOT TECHNOLOGIES

O.V. Okushko, I.P. Radko, V.A. Nalyvaiko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine
15 Heroiv Oborony St., Kyiv, 03041, Ukraine
Tel.: +38 (67) 495 6618, e-mail: okushko@nubip.edu.ua

This paper examines modern approaches to the development of intelligent systems for monitoring and forecasting electricity consumption under the implementation of the Microgrid concept. A system architecture based on Smart Grid and IoT technologies is proposed, and a laboratory prototype for studying the energy efficiency of electrical consumers is developed. The potential of applying machine learning algorithms for load forecasting and optimization of power system operating modes is demonstrated.

Keywords: intelligent systems, electrical equipment, monitoring, forecasting, low-voltage networks, nergy efficiency

ORCID: ¹0000-0002-1894-5294, ²0000-0002-4235-3969; ³0000-0002-6297-9045

Сучасний розвиток електроенергетики характеризується активним впровадженням відновлюваних джерел енергії, систем накопичення та цифрових технологій. Це призводить до ускладнення структури електричних мереж та підвищення вимог до ефективності їх функціонування. Традиційні підходи до керування електроспоживанням, що базуються на статичних режимах і періодичних вимірюваннях, не забезпечують необхідної гнучкості та адаптивності.

У цих умовах особливої актуальності набуває впровадження інтелектуальних систем моніторингу та прогнозування, які дозволяють здійснювати безперервний контроль параметрів електроспоживання, аналізувати поведінку навантаження та формувати оптимальні режими роботи. Основою таких систем є концепція Microgrid, яка об'єднує джерела генерації, накопичувачі та споживачів в єдину керовану енергетичну систему.

Інтелектуальна система моніторингу є комплексом технічних і програмних засобів, що забезпечують збір, обробку та аналіз даних у режимі реального часу. Вона дозволяє здійснювати контроль параметрів електромережі, прогнозувати навантаження та оптимізувати використання енергетичних ресурсів.

Основними функціями системи є: безперервний моніторинг електричних параметрів, аналіз профілів споживання, прогнозування навантаження, управління режимами роботи обладнання та виявлення аварійних ситуацій.

Використання IoT-сенсорів та інтелектуальних лічильників дозволяє отримувати великий обсяг даних, який обробляється за допомогою сучасних аналітичних платформ.

Архітектура інтелектуальної системи моніторингу має багаторівневу структуру (рис. 1) і включає такі основні рівні як польовий рівень (сенсори, датчики та вимірювальні пристрої тощо), комунікаційний рівень (канали передачі

даних (Ethernet, Wi-Fi, 4G/5G)), рівень обробки даних (локальна фільтрація та первинна аналітика), хмарний рівень (зберігання даних і машинне навчання), рівень управління (оптимізація режимів роботи системи) та рівень візуалізації (SCADA-системи та аналітичні панелі).

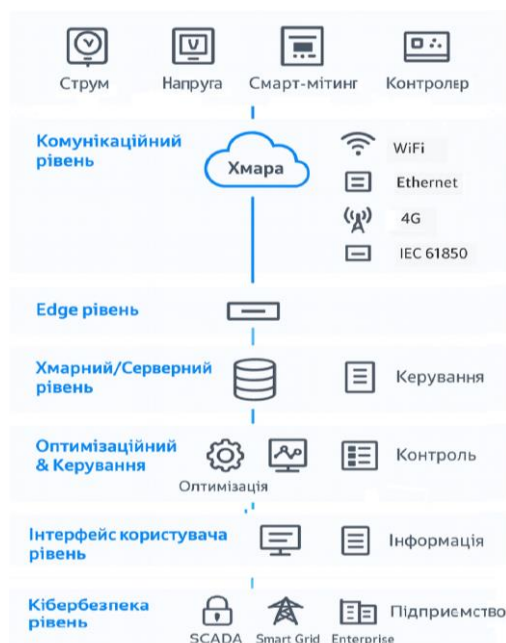


Рис. 1. Структурна схема рівнів архітектури інтелектуальної системи моніторингу

Така структура забезпечує масштабованість, надійність та можливість інтеграції з іншими системами. При цьому прогнозування є ключовим елементом цієї інтелектуальної системи, оскільки дозволяє передбачати зміну навантаження та запобігати перевантаженням.

Однією з ключових особливостей системи Microgrid є можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії, таких як сонячні та вітрові установки. Однак їхня генерація є нестабільною та потребує застосування інтелектуальних алгоритмів керування. В той же час, система моніторингу дозволяє прогнозувати генерацію енергії, балансувати її виробництво та споживання, керувати системами накопичення та забезпечувати автономну роботу самої мережі, що підвищує надійність електропостачання та зменшує залежність від зовнішніх джерел.

Крім того, система дозволяє переходити до прогностичного обслуговування обладнання, що знижує витрати на ремонт та підвищує ресурс роботи технічних систем.

ПОСИЛАННЯ

1. Дерев'яно 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>.
2. Кириленко О.В., Стогній Б.С., Денисюк С.П., Сопель М.Ф. Smart-моніторинг електроенергетичних систем. Технічна електродинаміка №5, 2024, С. 48 – 62. ISSN 1607-7970. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2024.05.04>.
3. Окушко О. В., Радько І. П., Наливайко В. А., Сорокін Д. С. Інтелектуальна система моніторингу та прогнозування стану електрообладнання на базі Microgrid // Енергетика і автоматика. – 2025. – № 5.
4. Окушко О. В., Радько І. П., Наливайко В. А., Сорокін Д. С. Інтелектуальна система моніторингу та прогнозування стану електродвигунів малої потужності на базі MICROGRID. Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 5 листопада 2025 р. Харків: ДБТУ, 2025. С. 126 – 127. – Режим доступу: <https://repo.btu.kharkiv.ua/handle/123456789/76109>.
5. Окушко О. В., Радько І. П., Наливайко В. А., Сорокін Д. С. Microgrid як платформа для інтелектуального моніторингу та управління електрообладнанням // Матеріали XXVI Міжнародного науково-практичного форуму «Теорія і практика розвитку агропромислового комплексу та сільських територій», 8–10 жовтня 2025 р. – Режим доступу: <https://repository.lnup.edu.ua/jspui/handle/123456789/58>.

УДК 621.311.016

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ І НАУКОВІ ПЕРЕДУМОВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ЕНЕРГОМЕНЕДЖМЕНТУ ЛОКАЛЬНОГО ОБ'ЄКТА

Р. Ю. Чередниченко¹, О. В. Окушко²

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна,
тел.: (050) 183-92-13, e-mail: r.cherednychenko@nubip.edu.ua

Узагальнено сучасний стан досліджень систем енергоменеджменту (EMS) локальних об'єктів та визначено ключові наукові передумови їх подальшого розвитку. Показано трансформацію EMS від систем моніторингу до інтелектуальних багаторівневих платформ керування, що інтегрують прогнозування, оптимізацію та координацію енергетичних ресурсів. Виявлено основні тенденції розвитку та наукові прогалини, пов'язані з недостатньою інтеграцією компонентів системи.

Ключові слова: EMS, Smart Grid, локальний об'єкт, мікромережі, енергоменеджмент.

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE AND SCIENTIFIC PREREQUISITES FOR THE DEVELOPMENT OF ENERGY MANAGEMENT SYSTEMS OF A LOCAL FACILITY

R. Yu. Cherednychenko¹, O. V. Okushko²

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15 Heroiv Oborony Str., Kyiv, 03041, Ukraine,
phone: (050) 183-92-13, e-mail: r.cherednychenko@nubip.edu.ua

The current state of research on energy management systems (EMS) of local facilities is summarized, and the key scientific prerequisites for their further development are identified. The transformation of EMS from monitoring systems to intelligent multi-level control platforms integrating forecasting, optimization, and coordination of energy resources is demonstrated. The main development trends and research gaps related to insufficient integration of system components are revealed.

Key words: EMS, Smart Grid, local facility, microgrids, energy management.

ORCID: ¹0009-0009-0561-4232; ²0000-0002-1894-5294.

Сучасний розвиток електроенергетики характеризується переходом до децентралізованих та інтелектуальних енергетичних систем, у яких локальні об'єкти трансформуються з пасивних споживачів у активні енергетичні вузли [1]. У таких умовах системи енергоменеджменту (EMS) набувають ключового значення як інструмент інтеграції процесів споживання, генерації та накопичення енергії.

Аналіз досліджень показує, що сучасні системи енергоменеджменту пройшли значний шлях розвитку від простих інструментів енергомоніторингу до складних інтелектуальних платформ управління, які здатні інтегрувати різноманітні енергетичні ресурси та забезпечувати багаторівневе керування [2,3]. Аналіз наукових досліджень показує, що системи енергоменеджменту від простих інструментів енергомоніторингу до складних інтелектуальних платформ управління, які здатні інтегрувати різноманітні енергетичні ресурси та забезпечувати багаторівневе керування [2,3]. На початкових етапах впровадження функціональні можливості EMS були обмежені здебільшого збором, збереженням та візуалізацією даних про споживання енергії, що давало змогу лише контролювати параметри та аналізувати показники. При цьому такі системи слугували інформаційною базою для ухвалення рішень, однак не передбачали безпосереднього впливу на процеси керування системами електроспоживання.

В той же час, сучасні системи EMS пов'язані із впровадженням методів інтелектуального аналізу даних, зокрема алгоритмів машинного навчання, прогнозування навантаження та оптимізації режимів роботи. Це дозволило перейти від пасивного моніторингу до проактивного управління, в межах якого система здатна не лише відображати поточний стан, але й формувати оперативне втручання з урахуванням прогнозованих змін умов функціонування [4] систем електроспоживання.

Крім того, сучасні EMS все частіше включають механізми координації розподілених енергетичних ресурсів, таких як відновлювані джерела енергії та системи накопичення, що значно ускладнює задачі управління та потребує

використання багатокритеріальних оптимізаційних підходів. У цьому контексті EMS трансформуються у кіберфізичні системи, здатні функціонувати в режимі реального або квазі-реального часу, забезпечуючи баланс між ефективністю, надійністю та економічною доцільністю функціонування локальних енергетичних об'єктів [2–4].

Залучення розподілених джерел генерації та систем накопичення [5] дозволяє істотно підвищити гнучкість енергетичних систем за рахунок можливості адаптації до змінних умов генерації та споживання. Зокрема, системи накопичення енергії забезпечують згладжування пікових навантажень, компенсацію коливань генерації відновлюваних джерел та підтримку балансу потужності. Це, у свою чергу, створює умови для підвищення автономності локальних об'єктів, зменшення залежності від зовнішніх енергетичних мереж та реалізації режимів *islanding*.

Крім того, ключовим чинником розвитку EMS є вдосконалення методів оптимізації та інтелектуального керування, включаючи використання математичних моделей, евристичних алгоритмів, а також методів штучного інтелекту. Ці підходи дозволяють розв'язувати задачі багатокритеріальної оптимізації, пов'язані з балансуванням енергетичних потоків, мінімізацією витрат, підвищенням надійності та ефективності системи. У результаті EMS набувають властивостей адаптивності, що дає змогу їм функціонувати в умовах невизначеності, зумовленої нестабільністю генерації відновлюваних джерел, змінами навантаження та впливом зовнішніх факторів [6].

Крім того, існуючі моделі EMS часто розглядають окремі задачі оптимізації без урахування реальних умов експлуатації локальних об'єктів, включаючи обмеження обладнання, змінність навантаження та невизначеність генерації відновлюваних джерел. У багатьох випадках відсутнє узгодження між короткостроковими задачами керування та довгостроковими економічними критеріями, такими як зниження витрат, підвищення енергоефективності та продовження ресурсу обладнання. Це ускладнює впровадження розроблених підходів у практичні системи енергоменеджменту.

У цьому контексті актуальним науковим завданням є розроблення інтегрованих підходів до побудови EMS, які забезпечують узгодження різних рівнів керування та враховують взаємозв'язок між технічними параметрами, економічними показниками та експлуатаційними умовами. Саме подолання фрагментарності досліджень і формування цілісної концепції EMS визначає подальший напрям розвитку даної наукової області.

Таким чином, сучасний стан досліджень EMS характеризується високим рівнем розвитку окремих технологічних рішень при одночасній недостатній інтеграції системного рівня. Це визначає необхідність розроблення комплексних підходів до побудови EMS, які поєднують прогнозування, оптимізацію, керування ресурсами та оцінювання ефективності в межах єдиної архітектури.

Отже, наукові передумови розвитку EMS полягають у поєднанні досягнень у галузі цифрових технологій, силової електроніки та методів інтелектуального керування. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення інтегрованих моделей енергоменеджменту локальних об'єктів, що забезпечують їх ефективне функціонування в умовах невизначеності та зростаючої частки відновлюваних джерел енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Ahsan, F., Hassan, N. U., Yuen, C., & Wen, C.-K. (2023). Data-driven next-generation smart grid towards sustainable energy management. *Energy Informatics*, 6(1), 1–25. <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00319-5>
2. Mischos, S., Dalagdi, E., & Vrakas, D. (2023). Intelligent energy management systems: A review. *Artificial Intelligence Review*, 56, 11635–11674. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10441-3>
3. Raza, A., Jingzhao, L., Ghadi, Y., Adnan, M., & Ali, M. (2024). Smart home energy management systems: Research challenges and survey. *Alexandria Engineering Journal*, 92, 117–170. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.01.XXX>
4. Hussain, A., Bui, V.-H., & Kim, H.-M. (2022). Machine learning-based energy forecasting in smart grids: A review. *Energies*, 15(21), 8079. <https://doi.org/10.3390/en15218079>
5. Shafiullah, M., Al-Sulaiman, F. A., & Al-Ammar, E. A. (2022). Review of recent developments in microgrid energy management strategies. *Sustainability*, 14(22), 14794. <https://doi.org/10.3390/su142214794>
6. Souza, M. E. T., Oliveira, R. C. L., Rocha, M. V., & Fernandes, R. A. S. (2022). Power electronics for modern sustainable power systems: A review. *Sustainability*, 14(6), 3597. <https://doi.org/10.3390/su14063597>

ФОРМУВАННЯ ПРІОРИТЕТІВ ВИВЕДЕННЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕГАЗОВИХ ВИМИКАЧІВ ЗА РЕЗУЛЬТАМИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ

Є. І. Бардик¹, О. Л. Бондаренко²

*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*

Запропоновано комплексну математичну модель визначення спрацьованого ресурсу елегазових вимикачів на основі нечіткої логіки, яка реалізує ієрархічний підхід до оцінки технічного стану функціональних вузлів та вимикача в цілому. Такий підхід забезпечує визначення ресурсу працездатності та імовірності відмови за результатами моніторингу, що дозволяє обґрунтовано формувати пріоритети технічного обслуговування та виведення елегазових вимикачів з експлуатації.

Ключові слова: *технічний стан, вимикач, нечітка логіка, моніторинг, імовірність відмови.*

FORMATION OF PRIORITIES FOR DECOMMISSIONING SF6 CIRCUIT BREAKERS BASED ON TECHNICAL CONDITION ASSESSMENT

Ye. Bardyk¹, O. Bondarenko²

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteyskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (097) 321-18-04, e-mail: bonduro@gmail.com*

A comprehensive mathematical model for determining the consumed life of SF6 circuit breakers based on fuzzy logic is proposed, which implements a hierarchical approach to assessing the technical condition of functional units and the circuit breaker as a whole. This approach ensures the determination of the remaining useful life and failure probability based on monitoring results, enabling well-founded prioritization of maintenance and decommissioning of SF₆ circuit breakers.

Key words: *technical condition, circuit breaker, fuzzy logic, monitoring, probability of failure.*

ORCID: ¹0000-0002-5776-1500; ²0000-0001-9444-8428.

Надійність роботи електроенергетичних систем (ЕЕС) значною мірою залежить від надійності роботи парку електрообладнання (ЕО), яке експлуатується на електростанціях і в електричних мережах. Процес експлуатації ЕО в умовах переходу до ЕЕС нового покоління пов'язаний із застосуванням сучасних засобів моніторингу та діагностування технічного стану (ТС), які дозволяють реалізувати стратегію технічного обслуговування (ТО) за фактичним станом СВМ (Condition-Based Maintenance). Стратегія СВМ передбачає проведення ТО залежно від ТС. Такий підхід дозволяє встановлювати пріоритетність проведення ТО. Як правило, першочерговим вважається ЕО з найгіршим ТС [1].

Загальний підхід управління процесом експлуатації парку ЕО відповідно до процедури планування сценаріїв з врахуванням фактичного ТС у межах стратегії СВМ можна представити як функцію [2]:

$$TC(t) = f(X(t), N, Y, D, S, T),$$

де $X(t) = (x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t))$ – вектор контрольованих параметрів; N – вектор граничних значень контрольованих параметрів; $Y = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ – множина класів ТС; D – інтерпретація рішень, які приймаються на кожному етапі експлуатації; $S = (s_1, s_2, \dots, s_k)$ – множина можливих керуючих впливів; T – множина правил переходів між станами ЕО.

Надійна робота ЕЕС визначається переважно безвідмовною роботою вимикачів. Вимикачі повинні надійно виконувати свої функції у різних станах та постійно бути готовими до виконання комутаційних операцій особливо в аварійних та післяаварійних режимах. Відмови та пошкодження вимикачів часто ведуть до серйозних аварій [3].

Тому, важливою задачею є розробка комплексної математичної моделі визначення спрацьованого ресурсу елегазових вимикачів для формування пріоритетів ТО. Складність виявлення аналітичних залежностей і класом ТС

об'єкта потребує для побудови відповідних моделей вимикача використання теорії нечітких множин і нечіткої логіки, що дозволяє подати в єдиній формі різномірну інформацію про об'єкт [3,4].

Комплексна математична модель елегазового вимикача побудована за принципом ієрархічної структури. На третьому рівні розташовані три експертні підсистеми часткових висновків щодо ТС функціонального вузла (ФВ) «Механізм приводу». Кожна підсистема містить чотири вхідні лінгвістичні змінні та відповідну базу знань. Оцінка ТС виконується на основі діагностичних параметрів з урахуванням вагових коефіцієнтів. На другому рівні здійснюється агрегування результатів попереднього рівня з визначенням ТС «Механізм приводу» та урахуванням вагових коефіцієнтів. Також на цьому рівні розташовані системи «Контактна система» та «Дугогасна камера», структура та принцип роботи яких є аналогічними підсистемам третього рівня. На першому рівні виконується середньозважена оцінка ТС елегазового вимикача шляхом агрегування результатів другого рівня. ТС вимикача визначається з урахуванням вагових коефіцієнтів, що відображають внесок кожного ФВ у загальний ТС.

Реалізація комплексної математичної моделі елегазового вимикача в середовищі MATLAB Simulink показана на рис. 1 та розділена на сім компонентів. П'ять компонентів відповідають нечітким експертним системам визначення ресурсу працездатності ФВ вимикача та підсистем механізму приводу. Два компоненти відповідають середньозваженій оцінці спрацьованого ресурсу механізму приводу та вимикача в цілому. Помаранчевим кольором позначені визначальні контрольовані параметри ТС кожного ФВ та підсистеми, які отримані в режимах Online та Offline моніторингу об'єкта. Також, помаранчевим кольором позначені блоки підсистем визначення вагових коефіцієнтів параметрів ТС і ФВ в частині внеску в рівень спрацьованого ресурсу. Блоки функцій належності термів вхідних лінгвістичних змінних ФВ та підсистем вимикача позначені сірим кольором. Блакитним кольором позначені блоки підсистем кількісної оцінки фактичного спрацьованого ресурсу ФВ вимикача та підсистем на основі алгоритму Мамдані з врахуванням вагових коефіцієнтів вхідних лінгвістичних змінних.

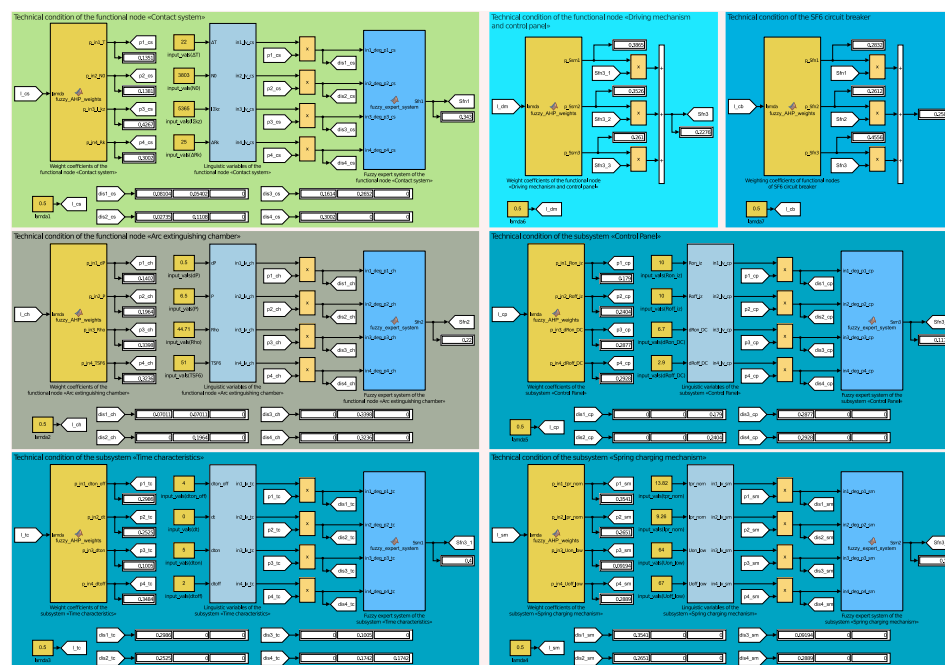


Рис. 1. Комплексна математична модель визначення ресурсу працездатності елегазового вимикача

Розроблена математична модель елегазового вимикача дозволяє, на основі декомпозиції об'єкта на окремі ФВ та побудованих лінгвістичних математичних моделей оцінки їх ТС, виконати агреговану оцінку ТС вимикача визначивши при цьому ресурс працездатності та імовірність відмови за інформацією отриманою при моніторингу, що дає змогу приймати обґрунтовані рішення щодо формування пріоритетів виведення з експлуатації на основі ТС.

ПОСИЛАННЯ

1. A Systematic Review for Switchgear Asset Management in Power Grids: Condition Monitoring, Health Assessment, and Maintenance Strategy / N. Zhou et al. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2023. P. 1–15.
2. Eltyshov D. K., Boyarshinova V. V. Intelligent decision support in the electrical equipment diagnostics. *2016 XIX IEEE International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM)*, 25–27 May 2016. 2016.

3. 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.
4. Костерев М. В., Бардик Є. І. Питання побудови нечітких моделей оцінки технічного стану об'єктів електричних систем. Київ : НТУУ «КПІ», 2010. 131 с.

БАЛАНСУВАННЯ МІКРОЕНЕРГОСИСТЕМ З ДЕФІЦИТОМ ПОТУЖНОСТІ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ЦИКЛІЧНИХ ГРАФІКІВ ВІДКЛЮЧЕНЬ

В. В. Войтенко

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вулиця Героїв Оборони, 15, м. Київ 03041, Україна,
тел.: (097) 667-99-99, e-mail: v.voytenko@nubip.edu.ua

У роботі розглянуто проблему балансування регіональних мікроенергосистем в умовах дефіциту потужності, спричиненого пошкодженням енергетичної інфраструктури. Запропоновано підхід до оптимізації потокорозподілу з урахуванням пріоритетності споживачів шляхом використання циклічних графіків відключень. Розроблено трирівневу математичну модель (A–B–F), яка реалізована на основі змішано-цілочислового лінійного програмування. Показано ефективність застосування лексикографічної оптимізації для забезпечення пріоритетного електропостачання критичних споживачів і мінімізації втрат у мережі.

Ключові слова: мікроенергосистема, дефіцит потужності, пріоритетні споживачі, потокорозподіл, графіки відключень.

BALANCING MICROENERGY SYSTEMS UNDER POWER DEFICIT BY APPLYING CYCLIC OUTAGE SCHEDULES

V. V. Voitenko

National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
15 Heroiv Oborony St., Kyiv 03041, Ukraine,
phone: (097) 667-99-99, e-mail: v.voytenko@nubip.edu.ua

The paper addresses the problem of balancing regional microenergy systems under power deficit caused by damage to the energy infrastructure. An approach to power-flow optimization with regard to consumer priority using cyclic outage schedules is proposed. A three-level mathematical model (A–B–F) based on mixed-integer linear programming has been developed. The effectiveness of lexicographic optimization for ensuring priority power supply to critical consumers and minimizing network losses is demonstrated.

Key words: microenergy system, power deficit, priority consumers, power flow, outage schedules.

ORCID: 0009-0005-0107-8357

В умовах масованих пошкоджень енергетичної інфраструктури України енергосистема функціонує у режимі постійного дефіциту потужності, що потребує ефективних методів адаптивного управління навантаженням. Практичне застосування графіків погодинних та аварійних відключень ускладнюється тим, що споживачі різної пріоритетності підключені до спільних фідерів 6–10 кВ, що обмежує можливості селективного керування.

Метою дослідження є обґрунтування принципів балансування мікроенергосистем на основі оптимізаційної моделі потокорозподілу з урахуванням критичності споживачів та циклічних графіків відключень.

Запропоновано трирівневу модель електропостачання типу A–B–F, де A — магістральні вузли (330 кВ), B — вузли розподільних мереж (110/35/10 кВ), F — фідери споживчих підстанцій. Керування здійснюється на рівні фідерів через бінарні змінні стану (ON/OFF) у часових циклах.

Для врахування пріоритетності введено коефіцієнт критичності фідера, що визначається часткою навантаження пріоритетних споживачів. На його основі фідери класифікуються на три групи: критичні, середньокритичні та некритичні. Це дозволяє адаптувати нормативні вимоги до реальної топології мереж.

Оптимізаційна модель сформульована як задача змішаного цілочислового програмування з лексикографічною цільовою функцією. Вводиться агрегований показник індексу покриття навантаження C :

$$C = \sum_{b \in B} \sum_{f \in F_B(b)} \sum_{t \in T} w_{cov}(fclass_{b,f}) y_{b,f,t}, \quad (1)$$

де: $w_{cov}(k_{b,f})$ — ваговий коефіцієнт класу критичності фідера, $k_{b,f} \in \{0,1,2\}$ відповідає класам NON, MID, CRIT, причому найбільше значення ваги надається класу CRIT.

Перший рівень цільової функції формулюється як задача максимізації інтегрального показника покриття навантаження:

$$C \rightarrow \max, \quad (2)$$

що забезпечує першочергове живлення фідерів з найбільшою часткою пріоритетних споживачів.

На другому рівні мінімізується момент потужності M , який визначається як зважена сума потоків по лініях із заданими довжинами за всі цикли:

$$M_i = \sum_{(i,j) \in E_{AA}} L_{i,j}^{AA} x_{i,j,t}^{AA} + \sum_{(i,b) \in E_{AB}} \sum_{t \in T} L_{i,b}^{AB} x_{i,b,t}^{AB} + \sum_{(b,i) \in E_{BA}} \sum_{t \in T} L_{b,i}^{BA} x_{b,i,t}^{BA} + \sum_{b \in B} \sum_{f \in F_B(b)} \sum_{t \in T} L_{b,f}^{BF} x_{b,f,t}^{BF}. \quad (3)$$

У програмній реалізації лексикографічна структура задається еквівалентною однорівневою цільовою функцією:

$$W_{lex} C - M - \varepsilon_{non} \sum_{\substack{b \in B \\ f \in F(b) \\ t \in T \\ k_{b,f}=0}} z_{b,f,t} \rightarrow \max, \quad (4)$$

де:

W_{lex} — великий коефіцієнт пріоритету покриття навантаження;

ε_{non} — малий штрафний коефіцієнт;

$z_{b,f,t}$ — допоміжні змінні, що відображають небажані послідовні ввімкнення некритичних фідерів.

У результаті при однаковому значенні індексу покриття C модель віддає перевагу рішенням з меншим значенням узагальненого моменту потужності M , а також стимулює більш рівномірний режим роботи некритичних фідерів.

Результати моделювання, наведені в таблиці 1, показали, що критичні фідери забезпечуються електропостачанням у 5–6 циклах із 6; середньокритичні — у 4–5 циклах; некритичні — у 3–4 циклах; відсутні пікові перевантаження та нераціональні перетоки потужності.

Таблиця 1.

Графік погодинних відключень фідерів (■ — відсутнє електропостачання, □ — наявне електропостачання)

Категорія фідера	00:00–04:00	04:00–08:00	08:00–12:00	12:00–16:00	16:00–20:00	20:00–24:00	ON, год	OFF, год
CRIT							24	0
MID							16	8
MID							16	8
NON							12	12
NON							12	12
NON							12	12
NON							12	12

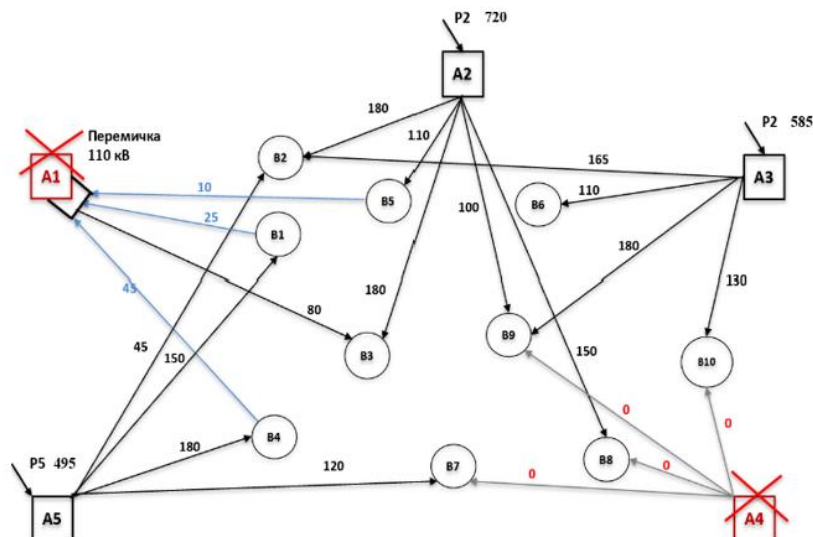


Рис. 1. Потокорозподіл у мережі за умов дефіциту потужності (цикл $t = 1$).

Отримані результати підтверджують, що використання циклічних графіків відключень у поєднанні з оптимізаційною моделлю дозволяє забезпечити баланс між надійністю електропостачання критичних споживачів і ефективністю роботи мережі. Балансування навантаження здійснюється за рахунок внутрішньої реконфігурації мережі, що сприяє підвищенню її живучості в умовах часткової втрати інфраструктури (рис.1).

Практична цінність полягає у можливості застосування розробленого підходу в системах диспетчерського керування операторів систем розподілу для формування графіків відключень; зменшення втрат електроенергії; уникнення перевантажень; підвищення живучості енергооб'єктів.

Перспективи подальших досліджень пов'язані з урахуванням стохастичних факторів, інтеграцією розподіленої генерації та розробкою систем автоматизованого керування в реальному часі.

ПОСИЛАННЯ

1. Про критичну інфраструктуру : Закон України від 16.11.2021 № 1882-IX // База даних «Законодавство України» / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1882-20> (дата звернення: 25.03.2026).
2. Постанова Кабінету Міністрів України від 24.05.2024 № 600 «Деякі питання функціонування критичної інфраструктури». URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/600-2024-п> (дата звернення: 25.03.2026).
3. Інструкція про складання і застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів : наказ Міненерго України від 23.11.2006 № 456 (зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1519-06> (дата звернення: 25.03.2026).
4. ENTSO-E. Security of Supply Monitoring Report 2022–2025. URL: <https://www.entsoe.eu/publications/system-operations-reports/security-of-supply-monitoring-report/> (дата звернення: 25.03.2026).

УДК 621.316.925

ОСОБЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ В МЕРЕЖАХ З ІНВЕРТОРНИМИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

С. М. Ремез

*Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна,
тел.: (050) 447-95-85, e-mail: s.remez@nubip.edu.ua*

Розглянуто особливості функціонування релейного захисту в мережах з інверторними джерелами розподіленої генерації та показано доцільність адаптивного налаштування уставок для підвищення чутливості, селективності й надійності захисту

Ключові слова: адаптивний релейний захист, розподілена генерація, інверторні джерела, селективність.

FEATURES OF IMPLEMENTING RELAY PROTECTION IN NETWORKS WITH INVERTER-BASED DISTRIBUTED GENERATION SOURCES

S. M. Remez

*2National University of Life and Environmental of Ukraine,
15, Heroiv Oborony st., Kyiv, Ukraine, 03041
phone: (050) 447-95-85, e-mail: s.remez@nubip.edu.ua*

The paper considers the specific features of relay protection operation in networks with inverter-based distributed generation sources and demonstrates the feasibility of adaptive setting adjustment in order to improve protection sensitivity, selectivity, and reliability.

Key words: adaptive relay protection, distributed generation, inverter-based sources, selectivity.

RCID: 0009-0000-4969-4662.

Зростання частки інверторних джерел розподіленої генерації суттєво змінює умови функціонування систем релейного захисту. На відміну від традиційних синхронних джерел, інверторні установки мають обмежену переважувальну здатність та, як правило, формують менші струми короткого замикання. Унаслідок цього традиційні струмові захисти з фіксованими уставками втрачають необхідну чутливість, а в окремих режимах не забезпечують належної селективності [1]. Додатковими ускладнювальними чинниками є двонаправлені потоки потужності, зміна топології мережі, секціонування фідерів та можливість переходу мікромережі в острівний режим. У таких умовах традиційні підходи не забезпечують необхідної чутливості, селективності та надійності [2]. Для сталої роботи інверторних джерел генерації критично важливим є час відключення пошкодженої ділянки і недопущення зниження напруги в мережі нижче порогових значень спрацювання захисту інверторних джерел.

Однією з ключових проблем є нестабільність параметрів аварійного режиму. Рівень струмів короткого замикання залежить від кількості підключених джерел, їх типу, алгоритмів керування інверторами, конфігурації фідера та поточного режиму роботи мережі. За таких умов порушується координація між основним та резервним захистом при зміні поточкорозподілу в мережі. Особливо складним залишається виявлення замикань на землю та високоімпедансних пошкоджень, для яких класичні струмові критерії виявляються недостатньо інформативними [3].

Актуальним напрямом підвищення ефективності релейного захисту є застосування адаптивного налаштування уставок. Загальний принцип такого підходу (рис. 1) полягає у безперервному оцінюванні поточного стану мережі та автоматичному коригуванні параметрів спрацювання відповідно до актуальних режимних умов. При цьому враховуються значення струмів і напруг, частота, напрямки потоків потужності, стан комутаційних апаратів, склад працюючих джерел генерації та фактична топологія мережі. Залежно від визначеного режиму роботи система обирає відповідну групу уставок або виконує їх оперативний перерахунок.

Перевага адаптивного підходу полягає у можливості забезпечення чутливого та селективного захисту як у мережевому, так і в острівному режимі [4]. Такий захист дає змогу зменшити ймовірність хибних або неселективних спрацювань, підвищити достовірність виявлення пошкоджень за знижених рівнів аварійних струмів і краще узгодити роботу фідерних, секційних та вузлових захистів. Водночас реалізація адаптивного налаштування потребує

наявності достовірної інформації про поточний стан мережі, високошвидкісних обчислювальних засобів та надійного обміну даними між пристроями захисту й автоматизації.



Рис. 1. Структурна схема роботи адаптивного релейного захисту в розподільних мережах середньої напруги з ДРГ.

Перспективність адаптивного релейного захисту визначається також його здатністю інтегрувати традиційні струмові та напрямні принципи з додатковими критеріями за напругою, частотою, швидкістю зміни частоти, фазовими кутами та логічною координацією дії суміжних пристроїв [5]. Такий комплексний підхід є особливо важливим для мереж із високою часткою інверторних джерел, де окремі параметри аварійного режиму вже не можуть розглядатися як достатня ознака пошкодження.

Отже, застосування адаптивного релейного захисту в мережах з інверторними джерелами розподіленої генерації є необхідною передумовою забезпечення надійності, селективності та стійкості електропостачання. Подальші дослідження в цьому напрямі доцільно зосередити на вдосконаленні алгоритмів оперативної ідентифікації режиму, оцінюванні впливу інверторних джерел на параметри аварійних процесів, а також на експериментальній перевірці ефективності адаптивних рішень у реальних умовах експлуатації.

ПОСИЛАННЯ

1. M. Meskin, P. Iyer, and A. Domijan, "Impact of PV Sources on the Overcurrent Relays in Medium Voltage Distribution Networks," in *Proceedings of the IEEE Green Technologies Conference (GreenTech)*, Denver, CO, USA, Mar. 2017, pp. 46–52. doi: 10.1109/GreenTech.2017.4.
2. B. Wang and L. Jing, "A protection method for inverter-based microgrid using current-only polarity comparison," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 8, no. 3, pp. 446–453, May 2020. doi: 10.35833/MPCE.2018.000722.
3. F. M. Abo-Shady, M. A. Alaam, and A. M. Azmy, "Impedance-Based Fault Location Technique for Distribution Systems in Presence of Distributed Generation," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, Oshawa, Canada, 28–30 Aug. 2013, pp. 1–6. doi: 10.1109/SEGE.2013.6707931.
4. C. Yu, Z. Gao, Z. Liu, and Z. Tao, "Current differential protection for active distribution networks based on adaptive phase angle compensation coefficient," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 8, p. 4723, Apr. 2023, doi: 10.3390/app13084723.
5. G. Frigo, A. Derviškić, Y. Zuo, and M. Paolone, "PMU-Based ROCOF Measurements: Uncertainty Limits and Metrological Significance in Power System Applications," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 68, no. 7, pp. 2617–2627, July 2019, doi: 10.1109/TIM.2018.2877102.

СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ БАЛАНСУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СПІЛЬНОТИ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖРЕЛ ТА ЛОКАЛЬНИХ ТЕС

В. В. Каплун, Є. О. Кулибаба

Національний університет біоресурсів і природокористування України,
вул. Героїв Оборони, 15, м. Київ, 03041, Україна,
e-mail:kaplun.v@nubip.edu.ua

Дослідження присвячене теоретичному та практичному обґрунтуванню моделі формування балансу систем комбінованого електрозабезпечення енергетичних спільнот з використанням біомаси та відновлюваних джерел. Запропоновані нові підходи динамічного ціноутворення локальних енергетичних спільнот.

Ключові слова: енергетична спільнота, мікронергосистема, відновлювані джерела, теплова генерація на біопаливі, комбіноване електрозабезпечення.

STRUCTURAL MODEL OF FORMING THE ENERGY BALANCE OF THE COMMUNITY BASED ON RENEWABLE SOURCES AND LOCAL TPPs

V. V. Kaplun, Y. O. Kulybaba

²National University of Life and Environmental of Ukraine,
15, Heroiv Oborony st., Kyiv, Ukraine, 03041
e-mail:kaplun.v@nubip.edu.ua

The study is devoted to the theoretical and practical substantiation of systems of combined energy supply of territorial communities in the conditions of the "green" transition. New structural models of the formation of local micro-energy systems with their own energy production are proposed.

Key words: energy community, micro-power system, renewable sources, thermal generation using biofuels, combined power supply.

RCID: 0000-0001-7040-9344

У зв'язку зі стрімким розвитком локальних енергетичних мікромереж з різномірними джерелами енергії, актуальним стало вивчення систем енергопостачання окремих територій та громад [1]. Процеси та підходи оптимального планування енергетичних балансів комбінованих мікронергетичних систем (КЕС) досліджені недостатньо. Особливістю побудови таких систем є використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та малих теплових електростанцій, що використовують місцеві види біопалива [2]. Особливою проблемою в оцінці енергетичного балансу мікронергетичних систем цього класу є визначення шляхів формування ефективної схеми ціноутворення, яка створить додаткові переваги для кінцевих споживачів.

Для моделювання було використано адаптований індуктивний комбінаторний алгоритм групового методу обробки даних [3]. Вибір математичного апарату для моделювання визначається кількома об'єктивними обмеженнями: висока вартість статистичного вивчення об'єкта дослідження; малий розмір статистичної вибірки; відносно великий розмір вектора параметрів.

Нехай вибірка статистичних даних задана як $\Omega = (Z, y)$, $\dim Z = n \times r$, $\dim y = n \times 1$ та існує клас лінійних моделей з параметрами: $y = \sum_{i=1}^m \theta_i \varphi_i(z)$, де $\varphi = (\varphi_1(z), \dots, \varphi_m(z))^T$ – вектор базової функції.

Структура моделі $y_f = f(X, \theta_f) = \sum_{i=1}^{S_f} \theta_i x_i$, де θ_f вектор S_f невідомих параметрів, S_f – складність моделі f , а $W = [X, y]$, $\dim X = n \times m$, $\dim y = n \times 1$ робоча вибірка $\Phi = \{f(X, \theta_f)\}$ як набір модельних структур у вибраному базисі.

Нам потрібно знайти рішення двох задач оптимізації:

- 1) задачі неперервної оптимізації для оцінки параметрів $\hat{\theta}_f = \underset{\theta_f \in QR}{\operatorname{argmin}} QR(y, X, \theta_f)$, де $QR(\cdot)$ – критерій параметричної ідентифікації кожної окремої моделі;

- 2) задачі дискретної оптимізації для вибору моделі: $\hat{y}_f^* = f^*(X, \hat{\theta}_f) = \underset{f \in \Phi}{\text{CRargmin}}(y, X, \hat{\theta}_f)$, де $QR(\cdot)$ — заданий критерій якості конкретної моделі.

У таблиці 1 наведено фрагменти вхідних даних для моделювання. Зауважимо, що це інформація про реальні статистичні дані показників за один календарний рік для інтегрального показника собівартості електроенергії.

Таблиця 1. Вихідні дані про частки виробництва електроенергії різнорідними джерелами у комбінованій мікроенергосистемі, мВт·год

Місяць	Загальна вартість електроенергії для покриття попиту енергетичної спільноти, \$	Тип джерела та рівень генерації електроенергії у балансі мікроенергосистеми				
		СЕС	ВЕС	мініТЕС на біопаливі	Газопоршнева електростанція	Система централізованого електропостачання
January	379036,0	58,02	538,56	2027,9	504,32	3128,8
February	375928,0	130,05	442,82	1953	498,97	5372,1
March	346744,0	288,15	626,48	1401,1	478,11	1864,2
April	332928,0	340,78	644,05	1711,6	490,36	1437,2
May	240363,0	537,65	676,92	2063,3	501,52	152,64
June	230823,0	562,26	418,75	1946,7	488,17	372,11
July	243691,0	584,11	432,79	674,95	469,14	1447
August	256818,0	462,05	365,94	2115,1	382,98	1223,9
September	260436,0	306,12	584,68	550,68	515,05	1941,5
October	279018,0	236,95	534,36	2289,6	490,13	1085,9
November	312289,0	69,12	232,56	2326,3	479,06	2264
December	350622,0	33,83	658,92	2463,7	505,19	2482,4

Застосування індуктивного комбінаторного алгоритму дозволило побудувати модель, яка, окрім вхідних табличних даних, також включала квадратичні параметри, що значно підвищило точність моделювання. Одержана модель описує залежність попиту (мВт·год) від генеруючих компонентів системи (1), а (2) описує залежність загальних витрат (\$) від тих самих змінних моделі.

$$\varphi_{dem}^1 = 20.9601x_1 - 3.1250x_3 + 37.7271x_4 - 1.4365x_5 + 0.0122x_1^2 + 0.0049x_1x_3 + 0.00266x_1x_5 + 0.0024x_2x_3 - 0.0071x_2x_4 - 0.000389x_2x_5 - 0.0009x_3x_4 + 0.00084x_3x_5 - 0.0261x_4^2 + 4.5497e-05x_5^2 \quad (1)$$

$$\varphi_{dem}^2 = 291.765x_1 - 719.56x_3 + 87.197x_4 + 0.111x_1^2 + 0.349x_1x_2 - 1.4617x_1x_4 - 0.63959x_2^2 + 0.169x_3x_4 + 0.6043x_4^2 + 0.6043x_5^2 \quad (2)$$

Запропоновано структурні моделі формування локальних мікроенергетичних систем, які сприятимуть формуванню їхньої енергетичної незалежності шляхом виробництва їх енергії на основі використання локальних видів біопалива та відновлюваних джерел енергії. Отримані результати дозволили встановити закономірності, які впливають на пошук оптимальних сценаріїв оперативного перерозподілу енергетичних потоків у системі комбінованого енерговиробництва.

ПОСИЛАННЯ

- 1) The European Green Deal – Delivering the Eu’s 2030 Climate Targets.
URL: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_23_4813
- 2) U.J.J. Hahnel, M. Herberz, A. Pena-Bello, D. Parra, T. Brosch, Becoming prosumer: revealing trading preferences and decision-making strategies in peer-to-peer energy communities, Energy Policy 137 (2020) 111098, <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111098>.
- 3) Soren, A., & Shastri, Y. (2019). Resilient design of biomass to energy system considering uncertainty in biomass supply. Computers & Chemical Engineering, 131, 106593. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106593>
- 4) Kaplun V., Trokhaniak V., Makarevych S., Radko I., Lytvyn V. Structuring the energy balance of territorial communities with local infrastructure assets for combined energy production. Machinery & Energetics. 2024. Vol. 15, No. 4. P. 22–33. DOI: 10.31548/machinery/4.2024.22.

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АДАПТИВНОГО РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ РОЗПОДІЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ

О. С. Яндульський¹, О. В. Цивон²

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
вул. Політехнічна, 37, м. Київ, 02000, Україна,
тел.: (096) 239-27-54, e-mail: tsyvon.o.v.-ek51mn@edu.kpi.ua

Дослідження роботи адаптивного релейного захисту розподільних електричних мереж при паралельній роботі двох сонячних електростанцій (PV-модулів).

Ключові слова: розподільна електрична мережа, відновлювальні джерела енергії, моделювання режимів роботи, релейний захист, адаптивні підходи.

RESEARCH ON THE OPERATION OF ADAPTIVE RELAY PROTECTION IN DISTRIBUTION ELECTRICAL NETWORKS WITH RENEWABLE ENERGY SOURCES

O. Yandulskyi¹, O. Tsyvon²

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Politechnic st., 37, Kyiv, 02000, Ukraine
phone: (096) 239-27-54, e-mail: tsyvon.o.v.-ek51mn@edu.kpi.ua

Research on the Operation of Adaptive Relay Protection in Distribution Electrical Networks during the Parallel Operation of Two Solar Power Plants (PV Modules).

Key words: distribution electrical network, renewable energy sources, operating mode modeling, relay protection, adaptive approaches.

ORCID: ¹0000-0002-0362-7947; ²0009-0004-0302-8129.

Інтеграція відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) у традиційні розподільні мережі (РЕМ) докорінно змінює характер перетоків потужності та величини струмів короткого замикання (КЗ) [1]. Традиційні пристрої релейного захисту з фіксованими уставками часто втрачають селективність при зміні кількості активних генеруючих одиниць або зміні топології мережі [2]. Впровадження адаптивного релейного захисту дозволяє динамічно коригувати параметри спрацювання залежно від поточного режиму роботи мережі, забезпечуючи надійне відключення пошкоджених ділянок без зайвих знеструмлень [3]. Це стає можливим завдяки використанню алгоритмів інтелектуального моніторингу та засобів цифрового зв'язку, які в реальному часі координують роботу захисних пристроїв для забезпечення максимальної стійкості енергосистеми.

Для дослідження використано імітаційну модель фрагмента РЕМ 110/35/10 кВ у середовищі Matlab/Simulink. Схема включає джерело потужністю 40 МВт, трансформатор ТД-40000/110 та сонячні електростанції (PV-модулі) потужністю 2 МВт кожен, які підключені через інверторні установки, що імітує реальний вплив ВДЕ в електромережі, що зазвичай складає до 10%. У якості основного пристрою релейного захисту мережі, використано максимально струмовий захист (МСЗ).

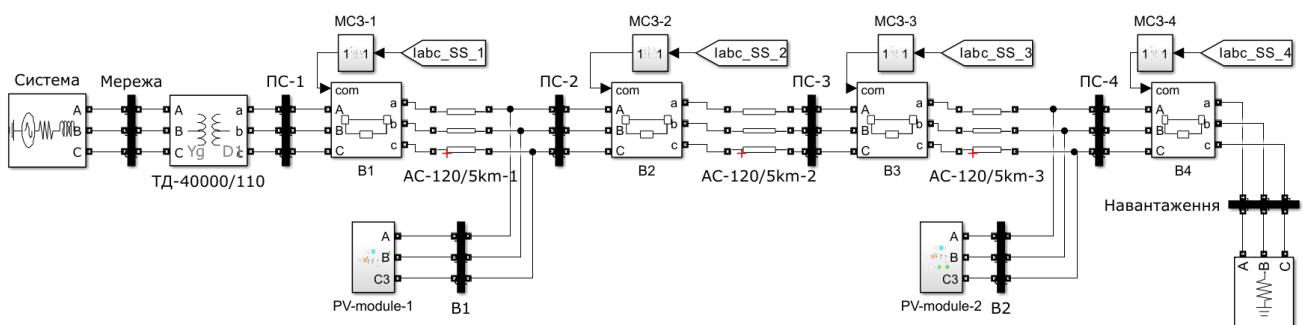


Рисунок 1. Модель схеми фрагменту РЕМ 110/35/10 при паралельній роботі 2-х PV-модулів у середовищі Matlab/Simulink

Логіка функціонування захисту базується на МСЗ із залежною екстремально інверсною характеристикою згідно зі стандартом IEEE C37.112 [4]. Ключовою умовою забезпечення селективності є вибір кратності уставки струму (TAP) для реле на пошкоджених та вищестоящій ділянках. Дана умова описується наступним обмеженням (1).

$$4 \leq \frac{I_{K3}}{K_{TC} \times TAP} \leq 6 \quad (1)$$

де K_{TC} – коефіцієнт трансформації трансформатора струму; I_{K3} – величина струму короткого замикання.

Для координації суміжних ступенів захисту використовується часова уставка (LEVEL), яка визначається таким чином, щоб час спрацювання основного реле був меншим за час спрацювання резервних захистів. Розрахунок часу спрацювання реле здійснюється за формулою екстремально інверсної (EI) кривої (2).

$$t = LEVEL \times \left[\frac{A}{\left(\frac{I_{K3}}{K_{TC} \times TAP} \right)^P - 1} + B \right] \quad (2)$$

Згідно до стандарту IEEE C37.112, для забезпечення необхідної крутизни характеристики прийнято наступні параметри: $A = 28.2$, $B = 0.1217$ та $P = 2.0$.

Адаптивний алгоритм передбачає перерахунок уставки часу t_{k-1} для вищестоящого реле з урахуванням ступеня селективності, що дозволяє динамічно реагувати на зміну рівнів струмів КЗ при зміні активної потужності PV-модулів. Результати порівняльного аналізу початкових та перерахованих налаштувань (табл. 2) підтверджують, що корекція значень TAP/LEVEL дозволяє зберегти чутливість захисту навіть при суттєвих коливаннях генерації в мережі.

Проведений розрахунок параметрів МСЗ (табл.1) для фрагмента РЕМ (рис.1), для режиму роботи без PV-модулів. Показує чітку часову селективність, при КЗ на ПС-4 основний захист МСЗ-4 спрацює за 0.146 с, тоді як резервний МСЗ-3 — за 0.256 с, з чого задовільняється заданий ступінь селективності $\Delta t = 0.1$ с що, визначає різницю між часом спрацювання основного та резервного захисту.

Таблиця 1 – Струм КЗ та час спрацювання МСЗ при КЗ на шинах підстанції

Інтеграція PV-модулів змінює перетоки потужності та рівні струмів КЗ на кожній з підстанції в мережі. Це призво-

Реле	TAP/ LEVEL на- лашту- вання	Підстанції на шинах яких виникло коротке замикання							
		Підстанція - 1		Підстанція - 2		Підстанція - 3		Підстанція - 4	
		Струм КЗ, А	Час спрацю- вання, с	Струм КЗ, А	Час вимк- нення, с	Струм КЗ, А	Час спрацю- вання, с	Струм КЗ, А	Час спрацю- вання, с
МСЗ-1	4.8/0.105	4977.1	0.04073	1931.2	0.210126	1183.8	0.58797	865.628	1.33411
МСЗ-2	2.9/0.131		-		0.101112		0.24804		0.48420
МСЗ-3	2.1/0.138		-		-		0.1387		0.25650
МСЗ-4	2.1/0.080		-		-		-		0.14644

дить до порушення селективності захисту, при початкових уставках TAP/LEVEL.

При використанні початкових налаштувань у режимі паралельної роботи двох PV-модулів розрахований час спрацювання реле МСЗ-4 становить 0.1127 с, а для МСЗ-3 — 0.2392 с. Внаслідок цього задана ступінь селективності $\Delta t = 0.1$ с, збільшується до 0.1265 с. Таке відхилення порушує селективність роботи релейного захисту.

Для виправлення цієї ситуації уставки були скориговані на основі розрахованих струмів КЗ при впливі ВДЕ, це дозволило скоригувати уставки коефіцієнта LEVEL для реле МСЗ-4 з 0.080 до 0.081. Результатом такої корекції стало збільшення часу спрацювання МСЗ-4 до 0.1505 с та МСЗ-3 до 0.2564 с. Що в свою чергу відновило необхідний часовий розрив між суміжними ступенями захисту, забезпечуючи їх узгоджену роботу в умовах активної генерації ВДЕ.

Таблиця 2 – Адаптивні уставки реле враховуючи підключення двох PV-модулів

РЕЛЕ	Струм короткого замикання (А)	початкові налашту- вання	Час спрацювання (с)	перераховані налаштування	Час спрацювання (с)
		TAP/LEVEL		TAP/LEVEL	
МСЗ-1	822	4.8/0.105	1.5713	4.8/0.106	1.6006
МСЗ-2	905	2.9/0.131	0.4474	3.1/0.125	0.4896
МСЗ-3	905	2.1/0.138	0.2392	2.2/0.134	0.2564
МСЗ-4	997	2.1/0.080	0.1127	2.4/0.081	0.1505

ПОСИЛАННЯ

1. Hadi Saadat. Power System Analysis. – PSA Publishing, 2010. – 740 p.
2. Ziegler G. Numerical Distance Protection: Principles and Applications. – Publicis Publishing, 2011. – 419 p.
3. Phadke A. G., Thorp J. S. Computer Relaying for Power Systems. – John Wiley & Sons, 2009. – 326 p.
4. IEEE Std C37.112-2018. IEEE Standard Inverse-Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays. – IEEE Power and Energy Society, 2018. – 35 p.
5. Janaka Ekanayake et al. Smart Grid: Technology and Applications. – Wiley, 2012. – 304 p.

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МЕРЕЖІ ЯК ОСНОВА МОДЕРНІЗАЦІЇ ЕНЕРГЕТИЧНОГО СЕКТОРУ УКРАЇНИ

О. С. Яндульський¹, В. С. Гулий²

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
кафедра автоматизації енергосистем,
проспект Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (044) 454-93-08, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net*

Розглянуто переваги концепції Smart Grid порівняно з традиційною моделлю енергосистеми України та її роль в інтеграції відновлюваних джерел енергії. Проаналізовано проблему зношеності інфраструктури та узагальнено досвід країн Балтії. Визначено можливості адаптації їхніх підходів з врахуванням особливостей енергосистеми України.

Ключові слова: розумні мережі, інтеграція ВДЕ, накопичувачі енергії, цифрові системи управління, модернізація електромереж.

SMART GRID AS THE BASIS FOR THE MODERNIZATION OF UKRAINE'S ENERGY SECTOR

O. S. Yandulskyi¹, V. S. Hulyi²

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
the department of power systems automation
37, Prospect Beresteyskyi, Kyiv, Ukraine, 03056
phone: (044) 454-93-08, e-mail: vladimir_hulyi@ukr.net*

The advantages of the Smart Grid concept compared to the traditional model of Ukraine's power system and its role in the integration of renewable energy sources are examined. The issue of infrastructure aging is analyzed, and the experience of the Baltic countries is summarized. Opportunities for adapting their approaches, taking into account the specific characteristics of Ukraine's power system, are identified.

Key words: smart grid, renewable energy integration, energy storage systems, digital control systems, power grid modernization.

ORCID: ¹0000-0002-0362-7947; ²0000-0002-2145-4082.

Розумні електричні мережі (Smart Grid) у порівнянні з традиційною моделлю функціонування енергосистеми, яка сьогодні переважає в Україні, відкривають суттєво ширші можливості для підвищення ефективності та надійності електропостачання. Існуючий підхід базується на централізованій генерації та односторонній передачі електроенергії до споживача, що обмежує гнучкість системи та ускладнює її адаптацію до змінних режимів роботи. Натомість концепція Smart Grid передбачає двосторонній обмін між усіма учасниками енергоринку, використання сучасних засобів автоматизації та цифрових технологій. Це дозволяє більш точно узгоджувати виробництво і споживання електроенергії, оперативно реагувати на збурення та зменшити втрати енергосистеми [1].

Актуальність розвитку розумних мереж в Україні значною мірою зумовлена швидким зростанням частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). За останні роки сонячна та вітрова генерація стали помітним елементом енергосистеми, формуючи до 15–20% встановлених потужностей. Водночас їхня робота має нерівномірний характер і залежить від погодних умов, що створює додаткове навантаження на систему балансування. У таких умовах саме інтелектуальні мережі дозволяють ефективніше інтегрувати ВДЕ завдяки використанню прогнозування, систем накопичення енергії та інструментів керування попитом. Без розвитку Smart Grid подальше нарощування частки ВДЕ може супроводжуватися зниженням стійкості енергосистеми [2].

В Україні вже визначені загальні напрями розвитку інтелектуальних мереж, зокрема у вигляді концепцій і дорожніх карт, які передбачають поступову модернізацію інфраструктури та впровадження цифрових рішень. Проте практична реалізація цих планів значною мірою стримується технічним станом енергосистеми. Значна частина електричних мереж і підстанцій є фізично зношеною, причому рівень зносу в окремих сегментах перевищує 60–

70%. Ситуація ускладнюється додатковими пошкодженнями енергетичних об'єктів, що знижує надійність електропостачання і потребує першочергового відновлення базової інфраструктури [3].

У цьому контексті доцільно звернутися до досвіду країн Балтії, які також розпочинали трансформацію енергетики зі схожих стартових умов. Для них були характерні застаріла мережева інфраструктура, обмежений рівень автоматизації та робота в умовах синхронізації з енергосистемою BRELL. Водночас ці країни мали можливість реалізовувати довгострокову політику модернізації в стабільних умовах, що стало важливою передумовою успіху. Перехід до сучасних принципів функціонування мереж відбувався поступово: модернізувалися ключові підстанції, розвивалися міждержавні лінії електропередачі, впроваджувалися цифрові системи моніторингу та керування, а також системи накопичення енергії [4]. Завершальним етапом стала синхронізація з європейською енергосистемою у 2025 році.

Проведений аналіз дозволяє стверджувати, що частина зазначених підходів є релевантною для України. Зокрема, доцільним є застосування поетапного підходу до модернізації мереж із концентрацією ресурсів на критично важливих вузлах, розвиток міждержавних інтерконекторів, а також впровадження технологій стабілізації режимів роботи, зокрема систем накопичення енергії та сучасних засобів моніторингу. Окремо варто відзначити ефективність пілотних проектів [5], які дозволяють відпрацювати технічні рішення перед їх масштабуванням.

Разом із тим пряме копіювання балтійської моделі є неможливим. Це зумовлено значно більшими масштабами енергосистеми України, вищим рівнем її пошкодження, а також наявністю воєнних ризиків. Крім того, трансформація в Україні відбувається в умовах обмежених фінансових ресурсів і необхідності одночасного відновлення та модернізації інфраструктури. Відмінності у структурі генерації та режимах роботи системи також потребують адаптації технічних рішень.

Таким чином, розвиток розумних електричних мереж в Україні має ґрунтуватися на поєднанні перевірених міжнародних підходів і врахуванні власних умов функціонування енергосистеми, що дозволить забезпечити її надійність, гнучкість та готовність до подальшого розвитку та інтеграції відновлюваних джерел енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Бондаренко С. А. Smart Grid у забезпеченні інтелектуалізації енергосистеми України // Social Development and Security. – 2019. – Т. 9, № 1. – С. 26–39. – DOI: <https://doi.org/10.33445/sds.2019.9.1.3>.
2. Кіншаков В. Ю., Рухлов А. В. Упровадження технологій Smart Grid при модернізації електроенергетичних систем в Україні // Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. – 2024. – № 2. – С. 71-76. – DOI: <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2024-2-11>.
3. Жорняк Л. Б., Бахметьев В. В. Аналіз стану розподільчих мереж 10–35 кВ в загальній енергосистемі України // Енергозбереження. Енергетика. Енергоаудит – 2025. – № 9. – С. 4-16 – DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2025.09.01>.
4. Dovhal, O. FEATURES OF THE PROCESS OF INTEGRATION OF THE BALTIC STATES INTO THE EU // Економічний про-
стір. – 2025. – № 203. – С. 77–81.
5. Атанов Ю. Smart Grid: Україна на шляху до енергетичної революції // Українська енергетика (онлайн). – 29 тра-
вня 2025. – Режим доступу: <https://ua-energy.org/uk/posts/smart-grid-ukraina-na-shliakhu-do-enerhetychnoi-revoliutsii> (дата звернення: 29.03.2026).

ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВСТІЙКОСТІ СИСТЕМ СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗУМНИХ МЕРЕЖ ТА МОБІЛЬНИХ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ CESIUM CLOCK В УМОВАХ ВОЄННОГО СТАНУ

В. В. Коваль¹, О. В. Самков², В. М. Зварич³, В. І. Вакась⁴, О. М. Піскун⁵, Б. О. Самков⁶

^{1,5}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

^{1, 2, 3, 6}Інститут електродинаміки НАН України,
просп. Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (044) 366-24-00, e-mail: samkov@ied.org.ua

⁴Приватне акціонерне товариство «Київстар»,
вул. Дегтярівська, 53, Київ, 03113, Україна,
тел.: (067) 220 68 25, e-mail: v.vakas@ieee.org

⁵Національний 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

У роботі представлено комплексний підхід до забезпечення відмовостійкості систем синхронізації в розумних мережах та мобільних телекомунікаціях України в умовах воєнного стану. Наведено практичні результати впровадження стратегії ешелонованої гібридної диверсифікації опорного сигналу з використанням ePRTC, Cesium Clock, засобів наземної передачі за протоколом PTP та автоматизованої комп'ютерно-інтегрованої системи багатоканального моніторингу сигналів синхронізації.

Ключові слова: розумні мережі, мобільні телекомунікації, система синхронізації, відмовостійкість, GNSS, PTP, ePRTC, Cesium Clock, моніторинг.

INCREASING THE RESILIENCE OF SMART NETWORKS AND MOBILE TELECOMMUNICATIONS SYNCHRONIZATION SYSTEMS USING CESIUM CLOCK IN MARTIAL ARTS CONDITIONS

V. V. Koval¹, O. V. Samkov², V. M. Zvaritch³, V. I. Vakas⁴, O. M. Piskun⁵, B. O. Samkov⁶

^{1,5}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

^{1, 2, 3, 6}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

⁴Private Joint Stock Company "Kyivstar", 53 Degtyarivska str., Kyiv, 03113, Ukraine,
tel.: (067) 220 68 25, e-mail: v.vakas@ieee.org

⁵National space facilities control and test center,
8, Kniaziv Ostrozkykh str., Kyiv, 01010, Ukraine,
phone: (044) 281-62-73, e-mail: piskun@nkau.gov.ua

The paper presents a comprehensive approach to ensuring resilience of synchronization systems in smart networks and mobile telecommunications of Ukraine under martial law. Practical results of implementing the strategy of echeloned hybrid diversification of the reference signal using ePRTC, Cesium Clock, terrestrial transmission facilities using the PTP protocol and an automated computer-integrated system for multi-channel monitoring of synchronization signals are presented.

Key words: smart grids, mobile telecommunications, synchronization system, resilience, GNSS, PTP, ePRTC, Cesium Clock, monitoring.

ORCID: ¹0000-0003-0911-2538; ²0000-0003-2790-8564; ³0000-0002-1271-4954, ⁴0000-0002-0378-9989;
⁵0000-0002-2009-9314; ⁶0000-0003-0080-1978.

Системи синхронізації в розумних мережах та мобільних телекомунікацій покоління 5G забезпечують формування часових міток відповідно з мікросекундою та субмікросекундною точністю [1, 2]. Часові мітки, які сформовані тільки на основі синхронізації від засобів супутникової навігації (GNSS), не відповідають вимогам відмовостійкості [3] та демонструють свою вразливість від завад та спотворень в умовах воєнного стану [2]. Відмовостійкість систем синхронізації є важливим фактором живучості об'єктів критичної інфраструктури України та їх інтеграцію у європейський енергетичний простір, тому вирішення проблем щодо підвищення відмовостійкості є актуальними як в умовах воєнного стану, так і в повоєнний період.

Надійність синхронізації часових міток в розумних мережах має вирішальне значення: погіршення показників якості на підстанціях електромереж може призвести до хибної роботи пристроїв релейного захисту та автоматики. Технологія синхронізованих векторних вимірювань з прив'язкою до сигналів точного часу, в системі моніторингу перехідних режимів WAMS [4], потребує мікросекундної точності часових міток, тому втрата такої точності конвертується у фазові похибки розрахункового вектора напруги. Це може призвести до хибної інтерпретації стану розумної мережі як аварійного збурення, що є неприпустимим для системи керування. В умовах дії радіоелектронного придушення та кібератак виникає реальний ризик повної деградації даних PMU, що унеможливає оперативне керування мережею. З метою підвищення відмовостійкості систем синхронізації пропонується впровадження стратегії захисту, яка базується на ешелонованій гібридній диверсифікації опорного сигналу: комбінуванні супутникових, наземних (сигналів, отриманих через кабельні лінії зв'язку від засобів частотно-часового забезпечення ДП "Укрметрестандарт", національної Системи координатно-часового та навігаційного забезпечення України) та автономних (Cesium Clock) джерел з використанням первинних еталонних генераторів ePRTC і автоматизованої комп'ютерно-інтегрованої системи багатоканального моніторингу сигналів синхронізації [2].

Прикладом вдалого практичного розв'язання проблеми залежності від GNSS (в умовах воєнного стану) є впровадження на діючій мережі мобільних телекомунікацій оператора «Київстар» обладнання ePRTC [5]. Ключовим елементом такої архітектури є використання новітніх Cesium Clock з оптичною накачкою та функціоналом фазової синхронізації. На відміну від попередніх поколінь, ці пристрої дозволяють здійснювати періодичне калібрування вихідного сигналу по фронту UTC від GNSS (коли сигнал стабільний) та працювати автономно. Висока стабільність дозволяє проводити калібрування лише 1-2 рази на місяць. В режимі утримання (holdover) максимальна похибка фази за 14 діб не перевищує 100 нс, що відповідає жорстким вимогам 5G та Smart Grid. Використання таких еталонів забезпечує автономну роботу мережі терміном до одного року. В процесі практичних розробок на мережах мобільних телекомунікацій було створено наземне джерело сигналів синхронізації з довгостроковим утриманням стабільної фази по фронту UTC, яке реалізовано з використанням протоколів RTP, транспортного середовища IP/MPLS, обладнання ePRTC. В перспективі, планується встановлення додаткового обладнання ePRTC, яке буде з'єднуватись між собою та забезпечувати резервування на рівні Cesium Clock. Отримані результати вимірювань підтверджують теоретичні положення щодо точності та відмовостійкості формування сигналів синхронізації.

Забезпечення відмовостійкості систем синхронізації є суттєвим фактором функціонування об'єктів критичної інфраструктури України. Стратегія підвищення відмовостійкості систем синхронізації, яка базується на ешелонованій гібридній диверсифікації опорного сигналу та її реалізація, з врахуванням вдалого практичного впровадження на діючій мережі мобільних телекомунікацій, з використанням комбінованих супутникових, наземних, автономних джерел, а також обладнання ePRTC й автоматизованої комп'ютерно-інтегрованої системи багатоканального моніторингу забезпечить надійне функціонування розумних мереж та інтеграцію ОЕС України у європейський енергетичний простір з найвищими показниками надійності.

ПОСИЛАННЯ

1. Інтелектуальні електричні мережі: елементи та режими: За заг. ред. акад. НАН України О.В. Кириленка. К.: Ін-т електродинаміки НАН України. 2016. 400 с.
2. Автоматизовані системи синхронізації сигналів з підвищеною відмовостійкістю. Монографія / В. В. Коваль, О. В. Самков, В. О. Тітко, В. І. Вакась, І. Я. Яніцький, О. Л. Осінський, Б. О. Самков, О. М. Піскун; НАН України, Ін-т електродинаміки, НУБіП України. Київ: Академперіодика, 2025. — 166 с.
3. Department of Homeland Security (DHS) Science and Technology Directorate (S&T), "Resilient PNT Conformance Framework, Version 2.0," May 2022. <https://www.dhs.gov/publication/st-resilient-pnt-conformance-framework>.
4. Кириленко, О.В., Стогній Б.С., Денисюк С.П., Сопель М.Ф. SMART-моніторинг електроенергетичних систем. Технічна електродинаміка. 2024. №. 5. С.48-62 <https://doi.org/10.15407/technd2024.05.048>.
5. Vakas V., Samkov O., Koval V. et al. Resilient phase synchronization networks using cesium clocks // TCSET2026 Proceedings. 2026.

АНАЛІЗ МЕТОДІВ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ В МІКРОМЕРЕЖАХ ДЛЯ ЗАДАЧ УПРАВЛІННЯ ПОПИТОМ

О. С. Головка¹, С. І. Ковтун²

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (098) 099-04-31, e-mail: oleksandr.holovko.work@gmail.com

Проведено порівняльний аналіз п'яти класів методів короткострокового прогнозування електроспоживання домогосподарств у мікромережах за критеріями точності, вимог до даних та обчислювальної складності. Обґрунтовано добір базових методів - SARIMA, метод випадкового лісу та LSTM – та їх комбінацій для подальших модельних експериментів із побудови персоналізованих профілів споживання.

Ключові слова: мікромережа, управління попитом, прогнозування електроспоживання, машинне навчання, гібридні моделі, профіль споживання.

ANALYSIS OF SHORT-TERM ELECTRICITY CONSUMPTION FORECASTING METHODS IN MICROGRIDS FOR DEMAND-SIDE MANAGEMENT

O. Holovko¹, S. Kovtun²

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
тел.: (098) 099-04-31, e-mail: oleksandr.holovko.work@gmail.com

A comparative analysis of five classes of short-term electricity consumption forecasting methods for household-level microgrids is performed using accuracy, data requirements, and computational complexity criteria. The selection of baseline methods - SARIMA, random forest, and LSTM - and their combination for further model experiments on building personalized consumption profiles is justified.

Key words: microgrid, demand-side management, electricity consumption forecasting, machine learning, hybrid models, consumption profile.

ORCID: ¹0009-0003-9591-0807; ²0000-0002-6596-3460.

Ефективне керування навантаженням у мікромережі передбачає розподіл лімітів потужності між споживачами на основі короткострокового прогнозу електроспоживання в горизонті від однієї години до доби. В архітектурі, що розглядається авторами, система енергоменеджменту мікромережі на основі даних інтелектуальних лічильників будує персоналізовані профілі споживання для кожного домогосподарства та динамічно перерозподіляє невикористану потужність, що висуває вимоги як до точності прогнозу, так і до обчислювальної складності методу. Точність прогнозу безпосередньо визначає операційні витрати: дослідження фіксують відхилення до 40% при суттєвих похибках [1], при цьому навіть 12% середньої абсолютної відсоткової похибки значно збільшує витрати на пікову потужність [2]. Метою роботи є порівняльний аналіз методів короткострокового прогнозування електроспоживання домогосподарств у мікромережах та обґрунтований добір базових методів для подальших модельних експериментів із побудови персоналізованих профілів споживання.

Найпростішими й найкраще інтерпретованими залишаються статистичні методи: авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього (ARIMA), її сезонне розширення (SARIMA) та модель Хольта-Вінтерса. Вони слугують природним еталоном, з яким порівнюють складніші підходи. Методи машинного навчання - випадкового лісу (Random Forest), XGBoost, штучні нейронні мережі (ANN) - здатні виявляти нелінійні залежності у споживанні без явного задання структури моделі. Ще вищу точність демонструють архітектури глибокого навчання, зокрема рекурентні мережі з довгою короткостроковою пам'яттю (LSTM) та згорткові нейронні мережі (CNN), що моделюють довготривалі залежності в часових рядах. Гібридні моделі комбінують переваги кількох класів - наприклад, статистичну декомпозицію тренду з нейромережевим уточненням залишків. Окремо виділяються імовірнісні методи на основі байєсівських нейронних мереж, які замість точкового прогнозу дають кількісну оцінку довірчого інтервалу похибки.

На основі огляду літератури виділено п'ять класів методів. Наведені нижче показники точності отримано з різних досліджень, що використовують відмінні набори даних та метрики (MAPE, nRMSE), тому вони відображають порядок досяжної похибки для кожного класу методів. Порівняльну характеристику за точністю, вимогами до даних, обчислювальною складністю та придатністю для задач мікромережевого управління наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняльна характеристика методів прогнозування електроспоживання в мікромережах

Клас методів	Похибка прогнозу, %	Вимоги до даних	Обчислювана складність	Придатність для мікромережі
Статистичні	3-8	Низькі	Низька	Середня [3]
Машинне навчання	2-5	Середні	Середня	Висока [4]
Глибоке навчання	1-3	Високі	Висока	Середня [5]
Гібридні	0,2-5	Середні-Високі	Висока	Середня-Висока [3, 6]
Імовірнісні	3-4	Середні	Середня	Висока [4]

Статистичні методи залишаються базовим інструментом у задачах з обмеженими даними та слугують природним еталоном для порівняння, однак поступаються точністю за нелінійних умов мікромережі [3]. Серед методів машинного навчання метод випадкового лісу демонструє похибку прогнозу 4.32% та зберігає стабільність за мінливих погодних умов; байєсівські нейронні мережі досягають похибки 3.58% і водночас забезпечують оцінку похибки прогнозу [4]. Методи глибокого навчання досягають найвищої точності - зокрема, похибку 2.11% на реальних даних ізольованої мікромережі, - однак вимагають значних обчислювальних ресурсів, що ускладнює їх розгортання на системах енергоменеджменту мікромережі [5, 7]. Гібрид методів машинного та глибокого навчання досягає коефіцієнта кореляції 0.99 при прогнозуванні для різних типів домогосподарств [6] - результат, безпосередньо значущий для задачі побудови персоналізованих профілів споживання. Окремим методологічним аспектом для моделей машинного та глибокого навчання є вибір стратегії багатокрокового прогнозування: пряма стратегія, за якої для кожного горизонту будується окрема модель, стабільно перевершує непряму (ітеративну) для мікромереж, оскільки уникає накопичення похибки на послідовних кроках [4].

Для подальших модельних експериментів із побудови персоналізованих профілів споживання домогосподарств обрано три базових методи, кожен з яких представляє свій клас: SARIMA як статистичний еталон із явним урахуванням добової та тижневої сезонності, метод випадкового лісу як стійкий до погодної мінливості метод машинного навчання з помірними обчислювальними вимогами [4], та LSTM як архітектуру глибокого навчання з найвищою точністю моделювання довготривалих залежностей [5, 7]. Ці методи охоплюють весь спектр від інтерпретованості до точності, а їх комбінування у гібридні моделі дозволить оцінити, який рівень складності є достатнім для задачі динамічного розподілу лімітів потужності між домогосподарствами мікромережі.

ПОСИЛАННЯ

1. Moazzen F., Hossain M.J. Multivariate Deep Learning Long Short-Term Memory-Based Forecasting for Microgrid Energy Management Systems. *Energies*, 2024, 17(17), 4360. DOI: 10.3390/en17174360.
2. Antoniadou-Plytaria K. et al. Effect of Short-term and High-resolution Load Forecasting Errors on Microgrid Operation Costs. *Proc. ISGT-Europe, IEEE*, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/ISGT-Europe54678.2022.9960535.
3. Kondaiah V.Y., Saravanan B., Sanjeevikumar P., Khan B. A review on short-term load forecasting models for micro-grid application. *J. Eng.*, 2022, 2022(7), 665-689. DOI: 10.1049/tje2.12151.
4. Tziolis G. et al. Direct short-term net load forecasting in renewable integrated microgrids using machine learning: A comparative assessment. *Sustainable Energy, Grids and Networks*. 2024. Vol. 37. 101256. DOI: 10.1016/j.segan.2023.101256.
5. I. Makris et al.. Exploring Load Forecasting: Bridging Statistical Methods to Deep Learning Techniques in Real-World Environment. *Proc. 20th DCOSS-IoT, IEEE*, 2024. P. 491-496. DOI: 10.1109/DCOSS-IoT61029.2024.00078.
6. Moradzadeh A. et al. Short-Term Load Forecasting of Microgrid via Hybrid Support Vector Regression and Long Short-Term Memory Algorithms. *Sustainability*, 2020, 12(17), 7076. DOI: 10.3390/su12177076.
7. Kurup J.R., et al. Comparative Study of Load Forecasting Techniques in Smart Microgrid. In: *Intelligent Solutions for Smart Grids and Smart Cities*. Springer, 2023. P. 253-263. DOI: 10.1007/978-981-99-0915-5_18.

УДК 536.421+536.63

КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ ПІДХІД СТВОРЕННЯ І ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЕЧНИХ ТЕПЛОАКУМУЛЮЮЧИХ РЕЧОВИН

О.О. Березовчук, А. В. Коник

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (066) 061-12-44, e-mail: Alina_tds@ukr.net*

В роботі представлено матеріали теоретичних і експериментальних досліджень механізмів накопичення теплової енергії при застосуванні речовин з фазовим переходом та дослідження їх робочих параметрів методом T-history.

Ключові слова: *мобільне теплове акумулювання, теплоакумулюючі речовини, матеріали з фазовим переходом, діапазон робочих температур.*

CONCEPTUAL APPROACH TO CREATION AND APPLICATION OF SAFE HEAT-ACCUMULATING MATERIALS

O. O. Berezovchuk¹, A. V. Konyk²

*Institute of Engineering Thermophysics Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
2a Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (066) 061-12-44, e-mail: Alina_tds@ukr.net*

The paper presents materials from theoretical and experimental studies of the mechanisms of thermal energy accumulation when using substances with phase transitions and the study of their operating parameters using the T-history method.

Key words: *Keywords: mobile thermal energy storage, thermal storage substances, phase change materials, operating temperature range.*

ORCID: ¹0009-0005-5894-4439; ²0000-0002-3188-8490.

Стрімкий розвиток відновлювальних джерел генерації енергії сонця і вітру у довоєнні роки в Україні викликав необхідність застосування теплових акумуляторів, як правило, ємнісного типу. Застосування теплових акумуляторів дозволяє підвищити маневреність системи генерації – накопичити енергію в сприятливий для генерації час та планомірно використовувати за необхідності.

Під час військових дій переважна більшість потужностей енергії сонця і вітру, створених за державними програмами, була знищена, як і багато інших енергетичних об'єктів державного значення. Тривалі вимкнення електроенергії та відсутність опалення у приватних споживачів, бізнесу, державних підприємств і військових об'єктів сприяли залученню всіх доступних джерел енергії різних потужностей на всіх рівнях. Тому на сьогоднішній день громадяни активно встановлюють сонячні панелі на дахах власних будинків, підприємці закуповують генератори і встановлюють джерела ВДЕ, на регіональному рівні монтується когенераційне обладнання і майже всі ці засоби генерації для надання стійкості системи теплозабезпечення використовують акумуляційне обладнання.

В теплових акумуляторах ємнісного типу у якості акумулюючої речовини, як правило, використовують воду. Однак у останні 10-15 років науковці спрямовують свої зусилля на дослідження природних речовин, матеріалів з фазовим переходом, а також створюють нові композиції, що дозволяють підвищити акумуляційну здатність систем. Визначаючими параметрами до застосування теплоакумулюючих речовин є швидкий час нагріву, тривалий час акумуляції і охолодження. Обмежуючими факторами є температурний діапазон роботи речовини, висока термоциклічність, вибухо- і пожежна безпека та економічна доцільність.

У Інституті технічної теплофізики НАН України в межах державного замовлення було створено мобільний тепловий акумулятор тепловою потужністю 0,5МВт (МТА-0,5МВт) [1]. Секція акумуляції МТА складається з акумуляційних ємностей, в якій застосовано поєднання трьох робочих тіл: води у якості теплоносія, універсальної теплоаку-

мулюючої речовини на основі водорозчинних полімерів [2] для заповнення об'єму ємностей та природнього матеріалу з фазовим переходом у «тепловому ядрі», встановленого у кожній ємності. Дві теплоакуючі речовини було досліджено методом T-history, визначено період нагрівання і охолодження, робочий діапазон температур, ефективну теплоту фазового переходу та теплофізичні параметри, які впливають на теплові параметри процесу акумуляції. В процесі вибору матеріалу з фазовим переходом та створення універсальної акумулюючої рідини було застосовано підходи і методики досліджень, якими користуються науковці для даного типу речовин. Розроблено концепцію вибору і дослідження робочих параметрів теплоакуючих речовин.

Отриманий досвід наразі застосовується при дослідженні речовин для теплових акумуляторів з високою тепловою потужністю у робочому діапазоні температур до 300°C.

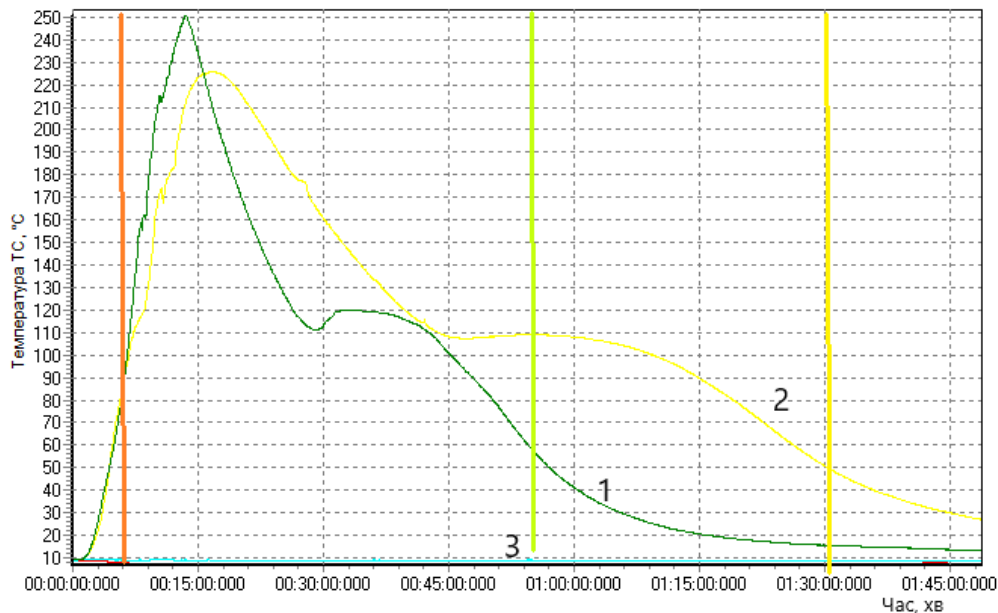


Рисунок 1. Залежність зміни температури еритролу в часі: 1 – зразок еритролу у ємності з більшою площею нагріву з примусовим охолодженням; 2 – зразок еритролу з поступовим охолодженням; 3 – температура оточуючого середовища.

На рисунку 1 представлено результати дослідження методом T-history еритролу. Маса зразків становить 100гр. Однак розташовані вони у ємностях різної конфігурації і процес охолодження здійснюється за різними механізмами. Встановлена початкова температура плавлення близька до $115 \div 120$ °C, весь об'єм розплавився у діапазоні від 225 до 250°C, що дає можливість розрахувати потужність джерела нагріву при проектних роботах. Складні піки при охолодженні кривих 1 і 2 свідчать про фазовий перехід і дозволяють оцінити період акумуляції і час охолодження створених теплових акумуляторів (ТА) із застосуванням досліджуваної речовини. Подальші дослідження дозволять отримати данні можливої кількості циклів до заміни еритролу у ємності. За необхідності аналогічним методом буде обрано речовини для відновлення акумуляційної здатності даного робочого тіла ТА. При отриманні позитивних результатів зразки еритролу досліджуються згідно з протоколом досліджень, визначаються теплофізичні та експлуатаційні характеристики.

ПОСИЛАННЯ

1. Demchenko V.G., Konyk A.V. (2022). Mobile thermal energy storage (M-TES). *Journal of New Technologies in Environmental Science*, 3, 91-96. <https://doi.org/10.53412/jntes-2022-3-2>
2. Демченко В.Г., Коник А.В., Фалько В.Ю. Патент на винахід №128359, Україна. МПК C09K5/00, C09K5/20, C23F11/00. Акумуляційна рідина для систем опалення та охолодження; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики НАН України; заявл. 24.12.2021; опубл. 19.06.2024, Бюл. №25/2024. <https://sis.nipo.gov.ua/uk/search/detail/1805576/>
3. Demchenko V., Konyk A.V., Dekusha H. (2023). Determination of components for heat storage material. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 4th International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technology, Social and Economic Matters (ICSEF-2023), 22-26 травня 2023, Кривий Ріг, 1254, 012033. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012033>

ГНУЧКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

О.В. Остапчук^{1,2}, М.П. Болотний^{1, 2}, Д.В. Дмитришин³,

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,

тел: +38(044)-204-82-33, e-mail: nickolai2007@gmail.com

²Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна

³ПРАТ НЕК УКРЕНЕРГО,
вул. Симона Петлюри, 25, м. Київ, 01032, Україна

У статті розглянуті питання забезпечення гнучкості енергосистеми в сучасних умовах трансформації електроенергетики. На основі проведеного аналізу показано, що в умовах інтеграції відновлюваних джерел енергії гнучкість вказує на здатність енергосистеми надійно підтримувати постачання енергії під час перехідних процесів та небалансів. Підвищення пропускної спроможності розподільних електричних мереж, застосування нових підходів у забезпеченні системної надійності за рахунок гнучкості ЕЕС з боку розподільних мереж та активних споживачів дозволить задовольнити вимоги споживачів до надійності їх електропостачання та якості електроенергії.

Ключові слова: гнучкість, надійність, електроенергетична система, розподільні мережі.

FLEXIBILITY OF ELECTRICAL POWER SYSTEM IN MODERN CONDITIONS

O. Ostapchuk^{1,2}, M. Bolotnyi^{1,2}, D. Dmytryshyn³,

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
ave. Beresteyskyi, 37, Kyiv, Ukraine, 03056,

²Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
20A Hnata Hotkevicha str., Kyiv, Ukraine, 02094

³NPC Ukrenergo,
25 Symona Petliury str., Kyiv, Ukraine, 01032

The article considers the issues of flexibility in power system under modern conditions of electric power industry transformation. The analysis shows that in the context of integrating renewable energy sources, flexibility indicates the power system ability to reliably maintain energy supply during transients and imbalances. Increasing the capacity of distribution networks, applying new approaches to ensuring system reliability due to flexibility of electrical power system from distribution networks and active consumers will allow satisfying the consumers requirements for power supply reliability and the quality of electricity.

Key words: flexibility, reliability, electrical power system, distribution networks.

ORCID: ¹0000-0003-3397-2423; ²0000-0002-7366-2430; ³0009-0006-5934-378X.

Сучасний розвиток суспільства зіткнувся з проблемою енергетичної кризи, що обумовлена збільшенням частоти аварійних ситуацій в електричних мережах [1]. Відбувається інтенсивна трансформація традиційної електроенергетики, впроваджується розподілена генерація, установки зберігання енергії, споживачі стають адаптивними та інтелектуальними. Наслідком є підвищення варіативності схемно-режимних умов експлуатації, особливо у розподільних мережах, що змінює властивості ЕЕС. В останні роки у світі досить активно розвивається процес керування попитом на електроенергію. Діючі механізми процесу керування, в першу чергу, пов'язані з економічними факторами, зокрема, зниження вартості на електроенергію при максимумах навантажень [2]. Напрямок забезпечення прийнятних економічних і технологічних параметрів ЕЕС за рахунок адаптивності всіх її суб'єктів називають гнучкістю ЕЕС, що тісно перетинається з традиційним напрямом забезпечення режимної надійності. Традиційно системна надійність ЕЕС розглядалась як балансова і режимна надійність по ієрархічному принципу та охоплювала лише об'єкти диспетчеризації. Гнучкість ЕЕС розширює балансову та режимну складові системної надійності до кінцевих електроустановок споживачів [3]. Під гнучкістю ЕЕС розуміють здатність енергосистеми надійно та економічно ефективно керувати мінливістю, невизначеністю попиту та пропозиції шляхом забезпечення стійкості

режиму та підтримки довгострокової надійності ЕЕС. Гнучкість ЕЕС також можна охарактеризувати як властивість ЕЕС зберігати нормальний або близький до нього режим при впливі внутрішніх (наприклад, раптові зміни та флуктуації потужності генеруючих джерел, навантажень, потоків по лініям електропередачі) та зовнішніх раптових збуреннях різного походження [4].

Основна відмінність гнучкості від режимної надійності полягає в наявності економічної та балансової складових. Ці складові з точки зору гнучкості ЕЕС часто забезпечуються за рахунок керування попитом на електроенергію та за рахунок установок зберігання електроенергії. Отже, гнучкість ЕЕС характеризує, зокрема, забезпечення режимної надійності найбільш економічним способом спрямованим на зниження вартості електроенергії для кінцевих споживачів. Також існує деяка схожість і ряд відмінностей у понятті гнучкості і балансової надійності ЕЕС. Балансова надійність забезпечує загальний попит на електроенергію, а гнучкість акцентує увагу на забезпечення локального балансу електроенергії вузлів ЕЕС (включаючи розподільні мережі) з урахуванням ринкових механізмів ціноутворення. Гнучкість сучасних ЕЕС передбачає вирішення завдання максимального використання відновлюваних джерел енергії з урахуванням забезпечення локальних та загальносистемних балансів потужності та електроенергії, забезпеченням режимної надійності та показників якості електроенергії.

Однією з визначальних властивостей ЕЕС в сучасних умовах є здатність роботи у форсованому режимі функціонування окремих елементів та ділянок розподільної електричної мережі. За інтенсивного введення в експлуатацію електростанцій на відновлюваних джерелах енергії, установок зберігання електроенергії відбувається зростання навантаження на розподільні мережі. Нові проблеми керування режимом ЕЕС викликані різко змінним і в цілому ненадійно передбачуваним характером навантажень ЕЕС. Комунально-побутові споживачі не залучені до оперативно-диспетчерського управління. Також малоімовірна перспектива їхнього залучення в майбутньому, внаслідок цього відсутній як такий діалог між споживачами та енергокомпаніями. У разі активного споживача з власною генерацією на відновлюваних джерелах енергії, можлива ситуація різкого переходу з режиму видачі електроенергії в режим споживання максимуму навантаження і навпаки без повідомлення енергокомпаній [5]. Тому традиційний підхід, де гнучкість ЕЕС забезпечувалась на рівні резервів потужної генерації та магістральних електричних мереж за загальної пасивності розподільних мереж, не дозволить забезпечити системну надійність ЕЕС в сучасних умовах функціонування.

Вирішення поставленої проблеми потребує зростання пропускної спроможності розподільних електричних мереж, застосування нових підходів у забезпеченні системної надійності за рахунок гнучкості ЕЕС з боку розподільних мереж та активних споживачів. Тому потрібний перегляд традиційних положень у сфері забезпечення системної надійності ЕЕС.

ПОСИЛАННЯ

1. Bolotnyi N., Lytvynchuk V., Kaplin M., Karmazin O. Analysis of the Probable Decrease of Load Shedding Reserve in Power System of Ukraine at Installed Capacity of Renewable Energy Sources / 2022 IEEE 8th International Conference on ENERGY SMART SYSTEMS (2022 IEEE ESS), 2022, Kyiv. — pp. 180-183. DOI: <https://doi.org/10.1109/ESS57819.2022.9969260>.
2. IRENA (2020). Renewable energy prospects for Central and South-Eastern Europe Energy Connectivity (CESEC). International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. 96 p. URL: <https://euagenda.eu/publications/irena-remap-cesec-2020> (дата звернення: 10.03.2026).
3. Тучинський Б.Г., Кудря С.О., Іванченко І.В., Іванчук В.Ю. Невідворотність переходу України до відновлюваної енергетики // Відновлювана енергетика. 2020. № 4. - С. 6–21.
4. Flexibility solutions to support a decarbonised and secure EU electricity system // European Environment Agency Report, 2023 — 38 p. DOI: 10.2800/104041. URL: <https://euagenda.eu/publications/eea-acer-flexibility-solutions-support-decarbonised-secure-eu-electricity-system> (дата звернення: 10.03.2026).
5. Остапчук, О.В., Болотний М.П., Дмитришин Д.В. Умови забезпечення балансової надійності для сталого розвитку локальних енергосистем // Електротехнічні та інформаційні системи, 2025 (107), с.14–23. <https://doi.org/10.32782/EIS/2025-107-3>

ПРОГНОЗУВАННЯ ІМОВІРНОСТІ ВІДМОВИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА ЗА УМОВ СТАРІННЯ ІЗОЛЯЦІЇ ТА ВПЛИВУ МЕТЕОРОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ

Є. І. Бардик¹, Я. С. Коваль²

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», кафедра відновлюваних джерел енергії, пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна, тел./факс +38(050)-188-1731, e-mail: bard1.yevgen@ukr

Метою роботи є розробка комплексної математичної моделі оцінки ризику відмови силового трансформатора, яка інтегрує термічне старіння ізоляції на основі моделі Арреніуса–Вейбулла, вплив метеорологічних факторів та перевантажень з урахуванням температури найбільш нагрітої точки (ННТ) обмотки.

Ключові слова: силовий трансформатор, імовірність відмови, старіння ізоляції, температура найбільш нагрітої точки, модель Арреніуса–Вейбулла, метеорологічні фактори, навантажувальна здатність, ризик-орієнтоване обслуговування.

PREDICTING THE PROBABILITY OF POWER TRANSFORMER FAILURE UNDER INSULATION AGING AND METEOROLOGICAL FACTORS

E. I. Bardik¹, Y. S. Koval²

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 the development of a comprehensive mathematical model for assessing the risk of power transformer failure, integrating thermal insulation aging based on the Arrhenius–Weibull model, the impact of meteorological factors and overloads, taking into account the winding hottest spot temperature (HST).

Key words: power transformer, failure probability, insulation aging, hottest spot temperature, Arrhenius–Weibull model, meteorological factors, loading capability, risk-oriented maintenance.

ORCID: ¹ 0000-0002-5776-1500; ² 0000-0001-8022-5821.

Силові трансформатори (СТ) є одними з найвідповідальніших елементів електроенергетичних систем (ЕЕС), відмови яких часто призводять до порушення сталого та динамічного стану, втрати стійкості вузлів навантаження і, в окремих випадках, до каскадного розвитку аварій [1]. Конкурентне середовище ринку електроенергії стимулює власників енергокомпаній до максимального завантаження СТ, що підвищує ризик відмови та загострює проблему забезпечення навантажувальної здатності протягом життєвого циклу [2]. Особливо актуальною ця проблема є для ЕЕС України в умовах систематичних атак на об'єкти енергетики, які супроводжуються критичними перевантаженнями обладнання та зміною топології мережі [3]. Використання середньостатистичних значень інтенсивності відмов не дає можливості враховувати індивідуальні характеристики СТ та різні сценарії експлуатації, що вимагає розробки комплексних моделей діагностування та аналізу ризиків [4].

Метою дослідження є розробка гібридної моделі оцінки ризику відмови СТ, яка об'єднує три складові: старіння ізоляції обмотки внаслідок втрати механічної міцності під дією підвищеної температури ННТ; вплив несприятливих метеорологічних умов; імовірність перевантажень внаслідок аварійних ситуацій в ЕЕС.

Модель температури найбільш нагрітої точки. Відповідно до методики IEEE C57.91, температура ННТ визначається за формулою [5]:

$$\theta_{\text{ННТ}} = \theta_0 + \Delta\theta_u + \Delta\theta_{\text{ННТ}}$$

де θ_0 — температура навколишнього середовища; $\Delta\theta_u$ — перевищення температури масла у верхніх шарах, що визначається як:

$$\Delta\theta_u = \Delta\theta_{u,\text{ном}} \cdot \left[\frac{1 + d(S^*)^2}{1 + d} \right]^x$$

де $S^* = S/S_{\text{ном}}$ — відносне навантаження, $d = \Delta P_k / \Delta P_{xx}$ — відношення втрат короткого замикання до втрат холостого ходу; $\Delta\theta_{\text{ННТ}} = \Delta\theta_{\text{ННТ,ном}} \cdot (S^*)^y$ — перевищення температури ННТ над температурою масла у верхніх шарах.

Модель імовірності відмови внаслідок старіння ізоляції. Деградація ізоляції описується моделлю Арреніуса–Вейбулла [6]. Номінальний термін служби ізоляції визначається як:

$$L = C \cdot \exp\left(\frac{B}{\theta_{\text{ННТ}} + 273}\right)$$

де B і C — постійні коефіцієнти. Інтенсивність відмов та функція розподілу імовірності відмов визначаються [7]:

$$\lambda_{i3}(t|\theta_{\text{ННТ}}) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

де параметр масштабу η дорівнює:

$$\eta = C \cdot \exp\left(\frac{B}{\theta_{\text{ННТ}} + 273}\right)$$

$$F_{i3}(t|\theta_{\text{ННТ}}) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta}\right]$$

де β — параметр форми розподілу Вейбулла, η — параметр масштабу, що залежить від температури ННТ. Модель передбачає однаковий параметр β для різних температур та постійність початкових параметрів C протягом терміну експлуатації [8].

Модель впливу метеорологічних факторів. Для врахування впливу несприятливих погодних умов (грози, ожеледь, ураганний вітер, блискавки) використано модель погоди з двома станами [9]. Інтенсивність відмов за погодних умов ω визначається на основі базової інтенсивності відмов λ_B , очікуваної тривалості нормального (N) та несприятливого (S) стану погоди та частки відмов f у несприятливу погоду. Імовірність відмови на інтервалі спостереження Δt :

$$F_{\text{пог}}(\Delta t) = 1 - \exp[-\lambda_{\text{пог}}(\omega) \cdot \Delta t]$$

Повна імовірність відмови. За умови незалежності факторів повна імовірність відмови СТ на інтервалі Δt визначається через об'єднання імовірностей:

$$F_{\Sigma}(\Delta t) = 1 - [1 - F_{i3}(T, \theta_{\text{ННТ}}, \Delta t)] \cdot [1 - F_{\text{пог}}(\Delta t)] \cdot [1 - F_{\text{пн}}(\Delta t)]$$

де $F_{\text{пн}}(\Delta t)$ — імовірність відмови внаслідок перевантаження, що визначається шляхом статистичного моделювання режимів ЕЕС [10].

Висновки. Розроблена комплексна модель дозволяє оперативному персоналу системних операторів кількісно оцінювати індивідуальний ризик відмови кожного СТ з урахуванням його реального теплового стану, метеоумов та режимних факторів. На відміну від підходів, що базуються на середньостатистичній інтенсивності відмов, запропонована модель забезпечує диференційовану оцінку ризику для різних сценаріїв експлуатації та є основою для впровадження стратегії ризик-орієнтованого обслуговування парку силових трансформаторів. Перспективи подальших досліджень включають інтеграцію моделі з корпоративними системами управління активами (EAM/CMMS), верифікацію на розширеному масиві експлуатаційних даних та врахування синергії дефектів у мультифакторному аналізі надійності.

ПОСИЛАННЯ

1. CIGRE Working Group A2.37. Transformer Reliability Survey. CIGRE Brochure 537, 2012. 123 p.
2. Wang, M., & Vandermaar, A. J. Condition monitoring and fault diagnosis of power transformers. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002. Vol. 18, No. 6. P. 26–42.
3. Кириленко О. В., Стогній Б. С. та ін. Інтелектуальні електроенергетичні системи: елементи та режими. Київ: Інститут електродинаміки НАН України, 2023. 430 с.
4. Li, W. Risk Assessment of Power Systems: Models, Methods, and Applications. 2nd ed. Wiley-IEEE Press, 2014. 464 p.
5. IEEE Std C57.91-2011. IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers and Step-Voltage Regulators. IEEE Power and Energy Society, 2011. 123 p
6. Montanari, G. C. Aging and life models for insulation systems based on Weibull distribution. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1990. Vol. 25, No. 6. P. 1046–1055.
7. Mazzanti, G. Life estimation of electrical components based on the Arrhenius-Weibull model. IEEE Transactions on Reliability, 2003. Vol. 52, No. 3. P. 350–359.
8. Jahromi, A., et al. A probabilistic approach for transformer remaining life assessment. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009. Vol. 24, No. 4. P. 1943–1950.
9. Billinton, R., & Allan, R. N. Reliability Evaluation of Power Systems. 2nd ed. Springer, 1996. 614 p.
10. Lezhniuk, P., Komar, V., & Kravchuk, S. Risk-based assessment of power transformer state in conditions of uncertainty. Energetyka i Automatyka, 2022. No. 4. P. 15–28

УДК 621.311.22:658.26

СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОАУДИТУ КОМУНАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УКРАЇНИ В УМОВАХ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ КРИЗИ

О. В. Бориченко¹, А. В. Чернявський², К. А. Чернявський³

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського",
Берестейський проспект (Перемоги), 37, м. Київ, 03056, Україна,

¹тел.: (093) 116-89-44, e-mail: borichenko_olena@ukr.net

²тел.: (050) 981-39-08, e-mail: cherniavskiy.anatolii@iit.kpi.ua

Розглянуто застосування системного підходу до енергоаудиту комунальних підприємств теплозабезпечення в умовах енергетичної кризи. Обґрунтовано необхідність комплексного аналізу підсистем виробництва, транспортування та споживання теплової енергії відповідно до ДСТУ ISO 50002:2016. На прикладі централізованої та децентралізованої моделей теплозабезпечення показано відмінності у підходах до енергоаудиту. Визначено, що системний підхід забезпечує формування стратегічних рішень модернізації. Розглянуто доцільність інтеграції когенерації та використання біопалива для підвищення енергетичної стійкості.

Ключові слова: енергоаудит, теплозабезпечення, системний підхід, енергоефективність.

SYSTEMATIC APPROACH TO ENERGY AUDITS OF MUNICIPAL DISTRICT HEATING ENTERPRISES IN UKRAINE UNDER ENERGY CRISIS CONDITIONS

O. V. Borychenko¹, A. V. Cherniavskiy², K. A. Cherniavskiy³

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteyskyi (former Peremohy), Kyiv, Ukraine, 03056

¹phone: (093) 116-89-44, e-mail: borichenko_olena@ukr.net

²phone: (050) 981-39-08, e-mail: cherniavskiy.anatolii@iit.kpi.ua

The paper examines the application of a systematic approach to energy auditing of municipal district heating enterprises under energy crisis conditions. The necessity of a comprehensive analysis of interrelated subsystems of heat generation, distribution, and consumption in accordance with the requirements of ISO 50002 is substantiated. Based on case studies of enterprises with centralized and decentralized heat supply structures, the differences in energy audit approaches and the development of energy efficiency measures are identified. It is demonstrated that the systematic approach enables a transition from local technical solutions to the justification of strategic directions for the modernization of heat supply systems. Additionally, the potential of integrating cogeneration units and the use of biofuels as elements for enhancing the energy resilience of municipal enterprises is considered.

Key words: energy audit, energy efficiency, district heating, systematic approach.

ORCID: ¹0000-0002-6127-2945; ²0000-0003-2858-8224.

В умовах енергетичної кризи комунальні підприємства теплозабезпечення функціонують під впливом дефіциту енергоресурсів, нестабільності енергопостачання та необхідності забезпечення безперебійного теплопостачання споживачів. При цьому існуючі системи теплозабезпечення в Україні характеризуються значним рівнем фізичного та морального зносу, високими втратами енергії та потребою у комплексній модернізації [1].

Як зазначається у [2], системи комунальної теплоенергетики є складними багаторівневими організаційно-технологічними системами, ефективність функціонування яких визначається узгодженістю процесів виробництва, транспортування та використання теплової енергії. Відсутність комплексного підходу до їх аналізу та розвитку призводить до фрагментарних рішень, неузгодженості інвестиційних заходів та неефективного використання паливно-енергетичних ресурсів.

У цьому контексті особливої актуальності набуває застосування системного підходу до енергоаудиту, що відповідає вимогам ДСТУ ISO 50002:2016 [3]. Системний підхід передбачає розгляд підприємства теплозабезпечення як

єдиної інтегрованої енергетичної системи, що включає джерела теплової енергії, теплові мережі, теплові пункти, електроспоживання та системи управління. Його сутність полягає у:

- формуванні повного енергетичного балансу підприємства;
- аналізі енергетичних потоків між підсистемами;
- виявленні системних втрат енергії;
- оцінці впливу режимів роботи обладнання на ефективність системи в цілому;
- розробленні комплексних заходів з енергоефективності та підвищення надійності системи теплозабезпечення з урахуванням взаємодії всіх елементів системи.

На відміну від традиційного підходу, орієнтованого на окремі елементи, системний підхід дозволяє виявляти причини неефективності, що виникають через неузгодженість роботи підсистем, зокрема між генерацією тепла та режимами функціонування теплових мереж.

Практичне застосування системного підходу до енергоаудиту було реалізовано на прикладі двох комунальних підприємств теплозабезпечення з різною архітектурою систем. Так, перше підприємство характеризується централізованою системою теплозабезпечення, де виробництво теплової енергії зосереджено на одній потужній котельні з використанням великогабаритних водогрійних котлів. У такій системі системний підхід до енергоаудиту фокусується на оптимізації режимів роботи котельного обладнання, підвищенні ефективності процесів спалювання палива та зниженні втрат у теплових мережах. В той же час, інше підприємство функціонує за децентралізованою схемою, що включає понад 30 котельень меншої потужності. У цьому випадку системний підхід передбачає агрегування даних по всіх джерелах теплової енергії, їх класифікацію за ефективністю та технічним станом, а також оптимізацію структури генерації теплової енергії на рівні всієї системи.

Порівняння цих моделей демонструє, що системний підхід має адаптивний характер:

- для централізованих систем ключовим є управління режимами роботи потужних джерел тепла та мінімізація втрат у мережах, а також комбінування різних джерел теплової енергії;
- для децентралізованих систем - оптимізація структури генерації, координація роботи розподілених джерел та підвищення ефективності окремих котельень, а також поетапне заміщення природного газу використанням біопалива та/або біогазу.

Застосування системного підходу дозволяє перейти від локальних технічних рішень до формування узгодженої стратегії розвитку підприємства теплозабезпечення, що враховує як технічні, так і організаційні аспекти функціонування. У межах системного підходу додатково обґрунтовується доцільність впровадження сучасних технологій генерації енергії. Зокрема, інтеграція когенераційних установок дозволяє підвищити ефективність використання палива та забезпечити часткову автономність підприємств за рахунок власної генерації електроенергії. Найбільш ефективним є їх застосування на об'єктах зі стабільним тепловим навантаженням або на ключових вузлах системи.

Отже, застосування системного підходу відповідно до ДСТУ ISO 50002:2016 забезпечує комплексну оцінку ефективності комунальних підприємств теплозабезпечення, дозволяє обґрунтувати стратегічні напрями їх модернізації, інтегрувати різні технологічні рішення в єдину оптимізовану систему теплозабезпечення та створює передумови для підвищення енергетичної стійкості в умовах енергетичної кризи.

ПОСИЛАННЯ

1. Стан та шляхи розвитку систем централізованого тепlopостачання в Україні : у 2 кн. / І. М. Карп [та ін.]. Кн. 1 / ІГ НАНУ, ІТТФ НАНУ. — Київ : Наук. думка, 2021. — 263 с.
2. Ковалко О. М., Новосельцев О. В., Євтухова Т. О. Вертикально-інтегровані структури управління ефективністю функціонування систем комунальної теплоенергетики : монографія. Київ : Інститут технічної теплофізики НАН України, 2017. 258 с.
3. ДСТУ ISO 50002:2016 Енергетичні аудити. Вимоги та настанова щодо їх проведення (ISO 50002:2014, IDT). 2016. 25 с.

УДК 621.311.25

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ІНВЕРТОРІВ У МІКРОМЕРЕЖАХ

В. О. Федотенко¹, В. В. Чижевський¹

¹Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
вул. Політехнічна 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (099) 092-05-18, e-mail: fedotenko.volodymyr@iit.kpi.ua

У роботі досліджено особливості паралельної роботи інверторів у мікромережах та проведено порівняльний аналіз переваг та недоліків підходів до підвищення ефективності їх функціонування, які ґрунтуються на аналітичній оптимізації розподілу струмів навантаження та методі асиметричної комутації з використанням допоміжного інвертора-фільтра.

Ключові слова: мікромережа інвертор, паралельна робота, ефективність, оптимізація розподілу струмів, метод асиметричної комутації.

INCREASING THE EFFICIENCY OF PARALLEL OPERATION OF INVERTERS IN MICROGRIDS

V. Fedotenko¹, V. Chyzevskiy¹

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
37 Polytechnic str., Kyiv, Ukraine, 03056

The paper investigates the characteristics of parallel inverter operation in microgrids and conducts a comparative analysis of the advantages and disadvantages of approaches to improving their operational efficiency based on analytical optimization of load current distribution and the method of asymmetric switching using an auxiliary filter inverter.

Keywords: microgrid inverter, parallel operation, efficiency, current distribution optimization, asymmetric switching method.

Організація паралельної роботи інверторів є одним з ключових завдань, яке постає в процесі функціонування сучасних мікромереж особливо у разі інтеграції до них відновлюваних джерел енергії. Наявність в мікромережі декількох інверторів забезпечує суттєве підвищення надійності її роботи та гнучкості регулювання режимних параметрів. Водночас, мультиінверторна конфігурація мікромережі зумовлює виникнення цілого ряду технічних проблем, обумовлених, передусім, відмінністю параметрів самих інверторів (індуктивностей фільтрів, падінь напруги на напівпровідникових ключах тощо), що призводить до нерівномірного розподілу струмів між паралельно працюючими пристроями. Результатом цього є виникнення циркулюючих зрівноважувальних струмів, які можуть зумовити перевантаження окремих інверторів, що призведе до погіршення показників якості електроенергії в мікромережі, її інтегральних техніко-економічних показників, зниження робочого ресурсу інверторів тощо.

Одним із підходів, який може бути застосований для вирішення зазначених проблем, є застосування аналітичного методу оптимізації, метою якого є максимізація ефективності мультиінверторної мікромережі шляхом мінімізації в ній циркулюючих зрівноважувальних струмів. Зазначений метод базується на оптимізації функції втрат активної потужності в мікромережі із застосуванням методу Лагранжа у стаціонарній системі координат d-q, який, на відміну від складних метаевристичних методів, надає можливість визначити оптимальну частку струму для кожного інвертора безпосередньо на основі його поточних режимних параметрів.

З метою реалізації цього підходу застосовується архітектура керування типу «master–slave», в рамках якої головний інвертор (master) забезпечує стабілізацію напруги на шині, до якої підключене навантаження, за допомогою контуру керування напругою на базі PID-регулятора, а оптимальні значення струмів підлеглих інверторів (slave) визначається за результатами розв'язання оптимізаційної задачі за критерієм мінімізації сумарних втрат активної потужності.

Архітектура керування типу «master–slave» повністю усуває проблему циркулюючих зрівноважувальних струмів, але потребує для забезпечення своєї роботи оцінювання у реальному часі параметрів режиму роботи інверторів з метою врахування змін споживаної активної та реактивної потужностей мікромережі, параметрів фільтрів тощо. З метою проведення такого оцінювання може бути застосовано швидкий рекурсивний алгоритм найменших ква-

дратів (RLS), який характеризується високою обчислювальною ефективністю та низькою розрахунковою затримкою. Керування комутацією інверторів здійснюється за допомогою синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (SPWM), налаштування коефіцієнтів PID-регуляторів виконано з використанням алгоритму оптимізації роєм частинок (PSO), що забезпечує високу точність та стабільність перехідних процесів.

Ефективність такого підходу було перевірено шляхом імітаційного моделювання системи з трьох паралельних інверторів у середовищі MATLAB за різних сценаріїв активного навантаження в діапазоні від 3 кВт до 10 кВт. За результатами моделювання та на основі порівняння з іншими поширеними методами оптимізації (PSO, нейронні мережі, методи внутрішньої точки та внутрішнього пошуку) показано ефективність застосування аналітичного методу оптимізації, наслідком чого стало 3% зниження загальних втрат активної потужності у порівнянні з традиційним рівномірним розподілом струму між інверторами, а також підтверджено швидкодію такого оптимізаційного підходу.

Альтернативним підходом до вирішення проблем організації паралельної роботи інверторів у мікромережі є використання асиметричної комутації із розподілом ролей. За такої архітектури керування головний інвертор працює на низькій частоті комутації (орієнтовно 3 кГц) і відповідає за видачу до мережі виключно активної потужності, а підключений паралельно до нього допоміжний інвертор малої потужності функціонує на високій частоті (орієнтовно 20 кГц) і видає до мережі виключно реактивну потужність, а також діє як активний фільтр (наприклад, на основі гістерезисного контролю струму (НСС)), необхідний для компенсації пульсацій струму, обумовлених низькою частотою комутації головного інвертора. Такий підхід суттєво знижує комутаційні втрати, що зумовлює підвищення загального коефіцієнту корисної дії інвертора до рівня близько 98%, та коефіцієнт нелінійних спотворень (THD).

Зважаючи на особливості реалізації розглянутих підходів до вирішення проблем організації паралельної роботи інверторів у мікромережі можна зробити такі висновки:

1. Аналітичний метод оптимізації є доцільним для мікромереж із масивом однотипних інверторів, які не мають суттєвої апаратної асиметрії, хоча такий підхід не знижує базових комутаційних втрат ключів при великих навантаженнях.
2. Підхід з асиметричною комутацією з допоміжним інвертором забезпечує суттєве зниження комутаційних втрат і надає змогу використовувати прості індуктивні фільтри замість складніших за будовою LCL-фільтрів, але потребує застосування різних алгоритмів керування інверторами (SVPWM для головного та НСС для допоміжного) і складність підключення додаткових інверторів до існуючої мікромережі через вузьку спеціалізацію кожного інвертора.

ПОСИЛАННЯ

1. Yu X., Khambadkone A. Control of parallel-connected power converters for microgrid. IEEE Transactions.
2. Gurugubelli V., Ghosh A., Panda A. K. Parallel inverter control using different conventional control methods and an improved virtual oscillator control method in a standalone microgrid. Protection and Control of Modern Power Systems.
3. Roslan M. A., Ahmad M. S., Isa M. A. M. Circulating current in parallel connected inverter system. PECON 2016-2016 IEEE 6th International Conference on Power and Energy. 2017.
4. Zaki M., Shahin A., Eskender S., Elsayes M. Improving efficiency of parallel inverters operation in island mode microgrids. Scientific Reports. 2023.
5. Isen E., Bakan A. F. Highly efficient three-phase grid-connected parallel inverter system. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy. 2018. Vol. 6(5). P. 1079–1089.

УДК 623.773.2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МАСКУВАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ У ІНФРАЧЕРВОМУ ДІАПАЗОНІ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО СПЕКТРУ

О. І. Шматок¹, С. М. Гончарук²

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 228-21-28, e-mail: alexshok@ukr.net*

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися методи експериментального визначення інтенсивності інфрачервоного випромінювання нагрітих поверхонь різних матеріалів та їх комбінацій з метою зниження випромінювальної здатності нагрітих поверхонь в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру.

Ключові слова: *термомаскування, тепловізор, тепловізійна камера, інфрачервоний діапазон, термоізоляція, випромінювальна здатність.*

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE CAMOUFLAGE PROPERTIES OF MATERIALS IN THE INFRARED RANGE OF THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM

O. I. Shmatok¹, S. M. Goncharuk²

*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*

When solving the tasks set in this work, methods of experimental determination of the intensity of infrared radiation from heated surfaces of various materials and their combinations were used in order to reduce the emissivity of heated surfaces in the infrared range of the electromagnetic spectrum.

Key words: *thermal camouflage, thermal imager, thermal imaging camera, infrared range, thermal insulation, emissivity.*

ORCID: ¹0009-0009-2133-2411; ²0000-0002-5609-7337

Сучасний стан розвитку приладів нічної фіксації, що застосовуються для відображення випромінювання нагрітих предметів в інфрачервоному діапазоні навіть в умовах відсутності природного чи штучного освітлення, зумовлює необхідність створення і використання засобів термомаскування шляхом зменшення випромінювальної здатності даних об'єктів.

Мета роботи полягає у дослідженні методів зменшення інтенсивності радіаційної тепловіддачі від нагрітих поверхонь або перешкодження його розповсюдженню шляхом підвищення опору теплопередачі від нагрітих об'єктів, з безпосередньою фіксацією результатів засобами тепловізійної фіксації.

Проведений аналіз доступних джерел за даним напрямком дозволяє виділити два основних фактори зниження теплового випромінювання нагрітих поверхонь: зменшення випромінювальної здатності захисного покриття, що перешкоджає тепловізійній фіксації захищених нагрітих поверхонь; теплоізоляція нагрітих поверхонь, яка запобігає нагріванню зовнішньої поверхні захисного покриття [1,2]. Обидва шляхи направлені на перешкодження розповсюдженню електромагнітного випромінювання від нагрітих об'єктів, не дозволяючи отримати контрастні зображення на фоні предметів навколишнього середовища.

Новизна дослідження полягає у експериментальному визначенні комбінацій матеріалів для теплоізоляції поверхонь і ефективного зменшення інтенсивності електромагнітного випромінювання від нагрітих об'єктів. Реалізація експериментальних досліджень забезпечувалась за допомогою експериментальної установки: що представляє собою електричний нагрівач (радіатор), обладнаний теплоакуючими пластинами з різноваріантним облаштуванням їх зовнішньої поверхні (рис.1 а).

Експериментальні дослідження були зосереджені на визначенні якісних і кількісних показників випромінювання в інфрачервоному діапазоні нагрітими поверхнями з різними типами покриттів за допомогою методів теплотрії та безпосередньої тепловізійної фотозйомки нагрітої плоскої поверхні, облаштованої різними варіантами і

комбінаціями теплоізолюючих матеріалів без низькоемісійного покриття і з низькоемісійними покриттями різних типів.

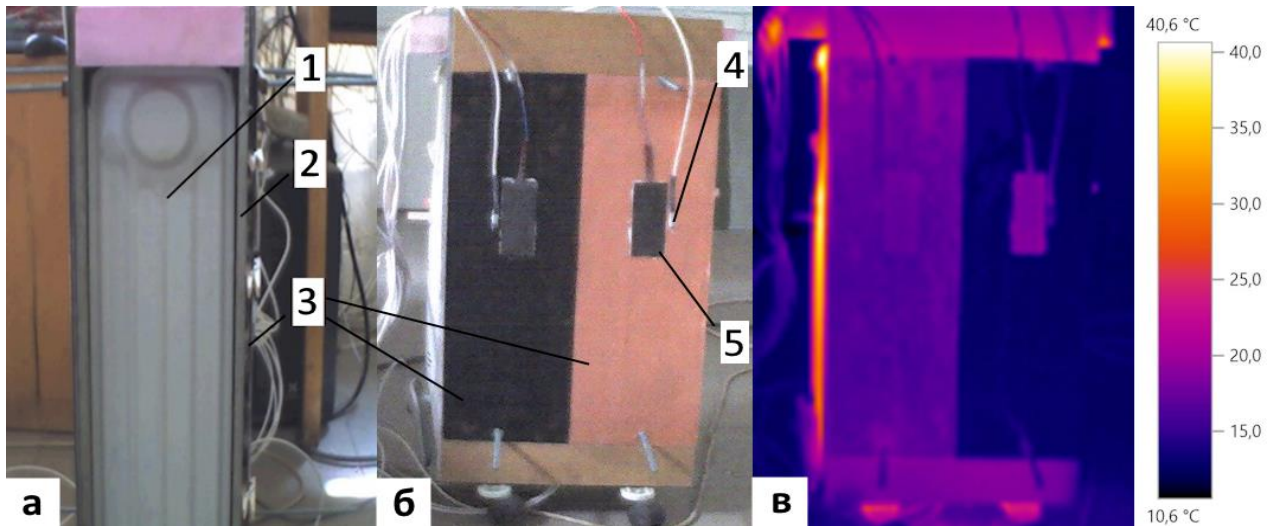


Рис. 1 Експериментальна установка для дослідження термомаскувальних властивостей матеріалів

1 – нагрівальний прилад; 2 – теплоакumuлююча пластина; 3 – експериментальний зразок; 4 – датчик температури; 5 – датчик теплового потоку

Для реалізації коректних вимірювань експериментальні зразки пластин з різними термозахисними покриттями облаштовувались контактними датчиками вимірювання теплового потоку та температури (рис.1 б).

Експериментально отримані тепловізійні та оптичні зображення для різних варіантів термозахисних покриттів нагрітої зовнішньої поверхні (рис. 1 в). Визначалась різниця між температурою зовнішньої нагрітої поверхні, що фіксується тепловізором та температурою, що фіксується контактним датчиком. Також виконувалось співставлення отриманих значень з температурою навколишнього середовища та температурою нагрітої пластини установки. За результатами експериментальних досліджень встановлено ефект зменшення радіаційної складової тепловіддачі в довкілля від модельного об'єкта, шляхом використання термозахисних пластин з різноваріантними покриттями. Зокрема для певних комбінацій матеріалів відзначено досягнення рівня температури, що фіксується тепловізором нижче за температуру навколишнього середовища.

В результаті експериментальних досліджень визначено найбільш перспективні матеріали для проведення подальших практичних досліджень та вимірювань, які дозволяють визначити найбільш прийнятні комбінації для виробництва термозахисних виробів відповідного призначення.

Визначено, що для дієвого та ефективного термомаскування необхідно використовувати багат шарові комбінації матеріалів, що зменшують інтенсивність випромінювання від нагрітих об'єктів, а також матеріалів з високими теплоізоляційними властивостями для зниження температури зовнішньої поверхні.

Практична цінність результатів даних досліджень полягає у їх подальшому застосовуванні для вибору оптимальних матеріалів для створення екрануючих поверхонь для нагрітих об'єктів, що підлягають термомаскуванню. Виготовлені термомаскувальні покриття з визначеними оптимальними параметрами зможуть забезпечити прихованість військових об'єктів від виявлення їх засобами оптико-електронних приладів, таких як тепловізор або прилад нічного бачення, шляхом гармонічного злиття їх відображення в інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектру із навколишнім середовищем.

Робота виконується за проектом Національного фонду досліджень України №2025.06/0054 «Поглинання та перешкоджання розповсюдженню електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону та створення засобів для термомаскування (шифр «Інфра»)» конкурсу «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України», договір №210.06/0054 від 02.03.2026 р.

ПОСИЛАННЯ

1. Pollock D. H. The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook. Vol. 7: Countermeasure Systems. Bellingham: SPIE Press, 1993. DOI: 10.1117/3.2543826
2. Su Y., Zhao X., Feng Z. Low infrared emissivity composite materials for multi-band camouflage // Textile Research Journal. – 2023. – Vol. 93, № 13–14. – P. 3128–3143. DOI: 10.1177/00405175231153181

ІНТЕГРАЦІЯ ПРИНЦИПІВ ЦИРКУЛЯРНОЇ ЕКОНОМІКИ ПРОЄКТУ RETRIEVE У ПОВОЄННУ ВІДБУДОВУ ЕНЕРГОСИСТЕМИ УКРАЇНИ: СТРАТЕГІЯ ІННОВАЦІЙНОГО СТРИБКА ТА ЕНЕРГЕТИЧНОГО СУВЕРЕНІТЕТУ

М. О. Карпаш^{1,1}, Л. Я. Жовтуля^{1,2}, Н.-А. Ю. Сорока^{1,3}, А. В. Яворський^{2,4}

¹Університет Короля Данила,
¹вул. Євгена Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ,
76018, Україна,

²Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
²вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна

тел.: (095) 032-11-50, e-mail: liubomyr.zhovtulia@ukd.edu.ua

Досліджено стратегічний дисонанс і довгострокову синергію між цілями проєкту Horizon Europe RETRIEVE щодо формування циркулярної економіки фотоелектричних (PV) модулів та загальними потребами енергетичної безпеки України в умовах війни. Показано, що дорожня карта, розроблена в рамках проєкту RETRIEVE для стабільного ринку ЄС, не вирішує короткострокових завдань балансування енергосистеми України, проте становить концептуальну основу для забезпечення довгострокової стратегічної автономії. Обґрунтовано, що застосування підходу «інноваційного стрибка» дозволяє Україні оминати недоліки Директиви WEEE, сформувати суверенну галузь перероблення EoL PV-модулів та підвищити конкурентоспроможність вітчизняної енергетики в умовах дії механізму CBAM.

Ключові слова: RETRIEVE, циркулярна економіка, EoL PV-модулі, Директива WEEE, CBAM.

INTEGRATION OF THE RETRIEVE PROJECT CIRCULAR ECONOMY PRINCIPLES INTO THE POST-WAR RECONSTRUCTION OF UKRAINE'S ENERGY SYSTEM: A STRATEGY OF INNOVATION LEAPFROGGING AND ENERGY SOVEREIGNTY

M. O. Karpash^{1,1}, L. Y. Zhovtulia^{1,2}, N.-A. Y. Soroka^{1,3}, A. V. Yavorskyi^{2,4}

¹ King Danylo University,
¹35, Yevhen Konovalets str., Ivano-Frankivsk,
Ukraine, 76018

² Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil
and Gas,
²15, Karpatska str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019

phone: (095) 032-11-50, e-mail: liubomyr.zhovtulia@ukd.edu.ua

The paper examines the strategic dissonance and long-term synergy between the goals of the Horizon Europe RETRIEVE project, which aims to advance a circular economy for photovoltaic (PV) modules, and Ukraine's wartime energy security needs. The RETRIEVE Policy Roadmap, designed for a stable EU market, does not address short-term grid balancing in Ukraine but serves as a blueprint for long-term strategic autonomy. An "innovation leapfrogging" approach is proposed to enable Ukraine to bypass the shortcomings of the WEEE Directive, establish a sovereign EoL PV recycling industry, and enhance the competitiveness of its energy sector under the CBAM mechanism. The results extend the authors' previous forecasting of PV park volumes and end-of-life management in Ukraine.

Key words: Hydrogen Valley, renewable energy, hydrogen value chain, industry.

ORCID: ¹0000-0002-4223-3828; ²0000-0001-5255-8522; ³0000-0002-8549-7014, ⁴0000-0002-5970-4286.

Енергетичний сектор України перебуває у стані безпрецедентної структурної трансформації, зумовленої систематичним руйнуванням централізованої генеруючої інфраструктури. Виникає парадокс «примусової модернізації»: умовою виживання стає прискорений перехід до децентралізованої, стійкої та гнучкої енергосистеми на основі розподіленої генерації. Згідно з проєктом Національного плану з енергетики та клімату (НПЕК), Україна взяла зобов'язання досягти частки ВДЕ у валовому кінцевому енергоспоживанні на рівні 27 % до 2030 р. [1]. Досягнення цієї мети потребує не лише нарощування сонячних і вітрових потужностей, а й подолання гострого дефіциту гнучкості: для балансування змінної ВДЕ-генерації необхідно розгорнути щонайменше 1,25–2 ГВт високоманеврової генерації та 0,64–0,8 ГВт установок зберігання енергії (УЗЕ) [1]. Лавиноподібне зростання парку PV-модулів загрожує ще одну стратегічну проблему — управління їх життєвим циклом та перероблення відпрацьованих (EoL) панелей [2].

Метою роботи є обґрунтування моделі імплементації дорожньої карти проєкту Horizon Europe RETRIEVE (Grant Agreement № 101122332) у контексті повоєнної відбудови енергосистеми України через підхід «інноваційного стрибка». Методологічну основу становлять системний та порівняльний аналіз регуляторних інструментів ЄС (Директива WEEE, CBAM, DPP) та вітчизняних стратегічних документів (НПЕК, Національна економічна стратегія), а також синтез з результатами попереднього дослідження авторів щодо прогнозування обсягів і управління EoL PV-парками України [2].

У роботі [2] авторами виконано прогноз обсягів накопичення відпрацьованих PV-модулів в Україні та розглянуто сценарії управління їх життєвим циклом. Це дослідження продовжує зазначену лінію, переходячи від кількісної оцінки EoL-потоків до формування регуляторно моделі їх перероблення на основі циркулярних принципів проєкту RETRIEVE. Таким чином, наукова новизна полягає у поєднанні прогнозних оцінок із механізмами промислової політики ЄС та формулюванні умов їх селективної адаптації для воєнного та повоєнного контексту України.

ЄС стикається зі стратегічною вразливістю, зумовленою залежністю від азійсько-тихоокеанської монополії у постачанні PV-модулів і критичної сировини (CRM). Проєкт RETRIEVE має на меті перетворити EoL PV-модулі на внутрішнє джерело CRM. Проведений аналіз засвідчує концептуальну обмеженість Директиви 2012/19/EU (WEEE): класифікація панелей як «великогабаритного обладнання» та методологія збору на основі показника «розміщено на ринку» (POM) породжують нестабільні цільові показники та системний даунсайклінг. Пропоновані RETRIEVE рішення охоплюють: технологічні інновації — сепарацію матеріалів гарячим лезом, гідрометалургійне вилучення понад 99 % срібла з нейтралізацією свинцю, валоризацію полімерів у синтез-газ з уловлюванням CO₂, очищення EoL-кремнію до сонячної якості; регуляторні інновації — перехід від Директиви WEEE до спеціалізованого Регламенту ЄС щодо PV із подвійними цілями (для об'ємних матеріалів та CRM) та обов'язкове впровадження Цифрового паспорту продукту (DPP).

Стратегія RETRIEVE є доктриною мирного часу, що виходить з лінійної моделі природного вибуття панелей через 25+ років. Натомість актуальна українська парадигма — доктрина воєнного часу, де стійкість визначається здатністю системи генерувати електроенергію під обстрілами. Дорожня карта не передбачає механізмів формування мікромереж, не розглядає фізичний і кібернетичний захист інверторів та не вирішує ключового фінансового бар'єру — надвисокої вартості капіталу внаслідок воєнних ризиків, де визначальним інструментом є страхування воєнних ризиків, а не модульовані збори EPR. Крім того, в умовах бойових дій життєвий цикл PV-модулів часто переривається примусово, і нове обладнання перетворюється на відходи [2].

Попри обмежену тактичну релевантність, результати проєкту є стратегічним активом для етапу енергетичного суверенітету. Після стабілізації системи Україна зіткнеться з такою ж вразливістю, що й ЄС — залежністю від імпорту азійських PV-модулів. Концепція «інноваційного стрибка», закладена у Національній економічній стратегії, дозволяє оминати помилки WEEE і відразу імплементувати актуальні рекомендації RETRIEVE [3]. Пропонована модель передбачає: національний спеціалізований регламент для EoL PV, що трактує зруйновані війною та відпрацьовані модулі як «стратегічне міське родовище» CRM для вітчизняного виробництва; узгодження з вимогами механізму коригування вуглецю на кордоні (CBAM) — локалізований замкнений цикл переробки EoL PV радикально знижує вбудований вуглецевий слід панелей, що захищає експортний потенціал та підвищує конкурентоспроможність української PV-індустрії на ринку ЄС; запровадження Цифрового паспорту продукту (DPP) для підвищення внутрішньої вартості активів і залучення європейських інвестицій у вторинне перероблення [3].

Проєкт RETRIEVE не пропонує прямих рішень для балансування енергосистеми України у воєнний період, однак забезпечує структурований, верифікований і готовий до імплементації план промислової політики для повоєнної відбудови. Інтеграція дорожньої карти з прогнозними оцінками EoL-потоків, отриманими у попередній праці авторів, дозволяє сформувати суверенну циркулярну індустрію виробництва та перероблення PV-модулів в Україні, гарантуючи економічну безпеку та повну інтероперабельність з ринками і кліматичними стандартами ЄС, зокрема CBAM. Подальші дослідження доцільно спрямувати на кількісне оцінювання потенціалу CRM-відновлення в умовах України та на розроблення проєкту національного регламенту щодо EoL PV.

ПОСИЛАННЯ

1. Розпорядження, План від 13.08.2024 № 761-р, «Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання».
2. Analysis of solar photovoltaic module parks in Ukraine: Forecasting their further operation and end-of-life management / M. Karpash et al. E3S Web of Conferences. 2025. Vol. 608. P. 01001. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202560801001> (дата звернення: 14.02.2025).
3. RETRIEVE Project (Horizon Europe, GA № 101122332). Deliverable D2.2: Policy Roadmap for the Circular Economy of Photovoltaic Modules. European Commission, 2024. URL: <https://retrieve-horizon.eu> (дата звернення: 20.04.2026).

НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ РОЗВИТКУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В УКРАЇНІ: СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

М. О. Карпаш¹, Л. Я. Жовтуля², В. Б. Васечко³

Університет Короля Данила,
вул. Євгена Коновальця, 35, м. Івано-Франківськ, 76018, Україна
тел.: (095) 028-76-22, e-mail: valentyn.vasechko@ukd.edu.ua

У роботі висвітлено трансформацію енергетичної системи України від централізованої генерації до парадигми розподілених енергетичних ресурсів в умовах війни. Проаналізовано поточний стан нормативно-технічного забезпечення, гармонізацію стандартів (зокрема щодо мікромереж) та виявлено критичні прогалини в регулюванні. Обґрунтовано необхідність імплементації міжнародних стандартів для забезпечення активної підтримки мережі та інтероперабельності систем.

Ключові слова: Децентралізована генерація, розподілені енергетичні ресурси, нормативно-технічне забезпечення, мікромережі.

REGULATORY AND TECHNICAL FRAMEWORK FOR THE DEVELOPMENT OF DECENTRALISED ELECTRICITY SUPPLY SYSTEMS IN UKRAINE: CURRENT STATUS AND PROSPECTS

M. O. Karpash¹, L. Y. Zhovtulia², V. B. Vasechko³

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (066) 222-22-22, e-mail: p_petrenko@gmail.com

This paper examines the transformation of Ukraine's energy system from centralised generation to a paradigm of distributed energy resources in the context of war. It analyses the current state of regulatory and technical support, the harmonisation of standards (particularly regarding microgrids), and identifies critical gaps in regulation. It justifies the need to implement international standards to ensure active grid support and system interoperability.

Key words: Decentralized generation, distributed energy resources (DER), regulatory and technical framework, Microgrids.

ORCID: ¹0000-0002-4223-3828; ²0000-0001-5255-8522; ³0009-0007-0414-7308.

Сучасна архітектура енергетичної системи України переживає фундаментальну трансформацію, зумовлену переходом від класичної моделі централізованої генерації до парадигми розподілених енергетичних ресурсів. Масштаб руйнувань протягом 2022–2025 років є безпрецедентним: втрата понад 9 ГВт генеруючих потужностей (еквівалент третини довоєнного споживання) та виведення з експлуатації 73% теплових енергоблоків станом на червень 2024 року [5]. Пошкодження всіх 15 ТЕС країни перетворило децентралізацію на безальтернативний фактор національного виживання. З огляду на ці виклики, в Україні стрімко розвиваються механізми активного споживача, що зміщує фокус генерації безпосередньо до кінцевого користувача і докорінно змінює архітектуру всієї енергосистеми.

Стандартизація в умовах війни виконує роль критичного механізму гарантування безпеки, стійкості і сталого розвитку. Україна здійснила значний ривок у гармонізації національних стандартів із європейськими вимогами (Network Code RfG).

Ключові досягнення нормативного забезпечення:

- Гармонізація стандартів: Прийнято ДСТУ EN 50549-1/2 [2] (вимоги до підключення генерації до LV та MV мереж) та серію ДСТУ IEC TS 62898, що регламентують планування та керування мікромережами. Розпочато впровадження ДСТУ EN IEC 62933 для систем накопичення енергії (BESS).

- Регуляторна адаптивність (НКРЕКП): Постанова НКРЕКП №13 від 03.02.2025 [6] стала фундаментом для формованого розгортання генерації. Вона впровадила механізм «єдиної заяви» до НЕК «Укренерго» для спрощення договорів приєднання.
- Механізм відступів: Запроваджено критично важливу процедуру отримання відступів від вимог Кодексу системи передачі з вікном схвалення до 3-х робочих днів. Це дозволяє вводити в експлуатацію об'єкти (тип В), чий системи телеметрії ще перебувають на етапі налаштування, що є вирішальним для виживання в осінньо-зимовий період.

Ці кроки трансформують роль Операторів систем розподілу (ОСР) із контролерів пасивних мереж на партнерів активних споживачів (просюмерів), що дозволяє залучити понад 1 ГВт нових потужностей за рахунок швидкої «воєнної імпровізації».

Попри прогрес, існують «сірі зони», що загрожують стійкості системи при масовому проникненні інверторної генерації:

1. Вразливість топології: Каскадне відключення 31 січня 2026 року, що призвело до зупинки Київського метро та знеструмлення 7 областей через порушення на лініях Румунія-Молдова-Західна Україна, довело: пошкоджена інфраструктура потребує нових стандартів стійкості, що базуються на автономних «островах».
2. Моніторинг у нестабільних мережах: Методології IEC 61000-4-30 Edition 3 (2015) вимагають адаптації для умов частих блекаутів. Особливу увагу слід приділити параметрам Rapid Voltage Change (RVC) та контролю гармонік. Хоча якісні інвертори демонструють THD < 3%, сумарний ефект від тисяч пристроїв у «слабких» мережах може перевищувати ліміт IEEE 519 (5%).
3. Захист в інверторних мережах: У мікромережах струми короткого замикання обмежені рівнем 1.2–1.5 номінального струму. Класичні релейні захисти в таких умовах недієві, що вимагає розробки нормативів для адаптивних алгоритмів захисту.
4. Дефіцит моделей агрегації: Відсутні затверджені математичні моделі для «віртуальних електростанцій» (VPP) на рівні багатоквартирних будинків або вулиць.

Для заповнення вакууму в площині стандартизації доцільно використовувати ієрархію міжнародних стандартів, що переходять від пасивного захисту до активної підтримки мережі.

Стандарт / Модель	Ключовий функціонал	Impact (Вплив на стійкість)
IEEE 1547-2018 (Cat. III)	Функції "Ride-Through" та динамічна підтримка напруги	Найвищий рівень стійкості до збоїв у розподільних мережах (аналог California Rule 21).
IEC 61850-7-420:2021	Об'єктно-орієнтоване моделювання DER	Забезпечує семантичну інтероперабельність через «Логічні Вузли» (LN) замість абстрактних адрес реєстрів.
IEEE 2030.5 (SEP 2.0)	RESTful протокол масової комунікації	Безпечне управління мільйонами побутових інверторів через відкриті мережі з використанням PKI-шифрування.
ISO 37123	Індикатори для «Стихких міст»	Кількісна оцінка здатності інфраструктури до самовідновлення за рахунок автономних мікромереж.

Майбутня архітектура Smart Grid має базуватися на глибокій інтеграції IT-рішень в енергетику. Впровадження стандартів для інтелектуальних систем енергоменеджменту (EnMS) за ISO 50001, що дозволяють реалізувати сценарії Peak Shaving для критичних навантажень (SEU).

Розвиток децентралізованих систем в Україні має базуватися на принципах активної підтримки мережі (active grid support) та повної інтероперабельності. Фізичне встановлення обладнання без єдиної інформаційної моделі (на базі IEC 61850) та протоколів безпеки (IEEE 2030.5) призведе до координаційного хаосу.

Україна потребує створення Національного стратегічного інноваційного хабу (на базі НІСД), який інтегрує досвід війни у нові міжнародні стандарти енергетичної стійкості.

ПОСИЛАННЯ

1. IEEE 1547-2018. Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces : IEEE Standard. 2018. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/1547/5915/> (дата звернення: 20.04.2026).

2. EN 50549-1/2:2019. Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks (Connection to LV/MV distribution networks) : European Standard. 2019.
3. IEC TS 62898-3-4. Microgrids – Part 3-4: Technical requirements – Monitoring and control systems : IEC Technical Specification. 2023. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/67711> (дата звернення: 20.04.2026).
4. IEC 62933-5-2. Electrical energy storage (EES) systems – Part 5-2: Safety requirements for grid-integrated EES systems – Electrochemical systems : IEC Standard. 2025. URL: <https://webstore.iec.ch/en/publication/68297> (дата звернення: 20.04.2026).
5. Empowering Ukraine Through a Decentralised Electricity System : IEA Report / International Energy Agency. 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/empowering-ukraine-through-a-decentralised-electricity-system> (дата звернення: 20.04.2026).
6. Про затвердження змін до Кодексу систем розподілу та спрощення процедур приєднання об'єктів розподіленої генерації : Постанова НКРЕКП від 03.02.2025 р. № 13. Офіційний вебсайт НКРЕКП. 2025. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v2187874-25#Text> (дата звернення: 20.04.2026).

УДК 621.316.1

ОЦІНЮВАННЯ ОСНОВНОЇ ЧАСТОТИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФАЗОВИМ МЕТОДОМ НА ОСНОВІ ПЕРЕТВОРЕННІ ГІЛЬБЕРТА ІЗ КОВЗНИМ УСЕРЕДНЕННЯМ НАБІГУ ФАЗИ НАПРУГИ

В. П. Малько¹, С. І. Ковтун², Ю. В. Куц³, В. Ю. Куц⁴

^{1,2,3,4}Інститут загальної енергетики НАН України, вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

³НТУУ "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського", просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна, тел.: (098) 995-66-10, e-mail: ¹VovaMalko03@gmail.com

Запропоновано метод прецизійного визначення основної частоти напруги електропостачання за наявності вищих гармонік та широкопasmового шуму шляхом застосування фазового методу, основаного на перетворенні Гільберта із застосуванням ковзного усереднення набігу фази напруги. Метод дає змогу оцінювати основну частоту напруги з високою точністю як за наявності вищих гармонік, так і шуму, та може бути використаний в задачах моніторингу показників якості електроенергії.

Ключові слова: оцінювання частоти, дискретне перетворення Гільберта, моніторинг показників якості електроенергії.

ESTIMATION OF THE FUNDAMENTAL FREQUENCY OF THE POWER SUPPLY VOLTAGE USING A PHASE METHOD BASED ON THE HILBERT TRANSFORM WITH MOVING AVERAGING OF THE ACCUMULATED VOLTAGE PHASE

V. Malko¹, Y. Kuts², S. Kovtun³, V. Kuts⁴

^{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. Beresteyskiy, Kyiv, Ukraine, 03056 phone: (098) 995-66-10, e-mail: ¹VovaMalko03@gmail.com

The method of precise determination of the fundamental frequency of the power supply voltage under the conditions of higher harmonics and broadband noise is proposed by applying the phase method based on the Hilbert transform with the use of sliding averaging of the the accumulated voltage phase. The method makes it possible to estimate the fundamental frequency with high accuracy in the presence of both higher harmonics and noise and can be used in tasks of monitoring power quality characteristics.

Key words: frequency estimation, discrete Hilbert transform, monitoring of power quality indices.

ORCID: ¹0000-0003-2879-7915; ²0000-0002-8493-9474, ³0000-0002-6596-3460, ⁴0000-0002-1939-0032

Моніторинг показників якості електроенергії потребує застосування методів прецизійного визначення основної частоти напруги електропостачання з метою усунення ефекту витоку спектра Фур'є, притаманного більшості методів оцінювання цих параметрів. Для його усунення застосовують когерентну дискретизацію – узгодження частоти дискретизації, основної частоти та обсягу вибірки, забезпечуючи ціле число періодів і зменшуючи розтікання спектра. Для досягнення цієї мети в роботі [1] запропоновано метод прецизійного оцінювання основної частоти напруги (далі – базовий метод) на основі фазового методу з дискретним перетворенням Гільберта (ДПГ). Такий підхід дає змогу оцінювати основну частоту напруги з високою точністю за дії вищих гармонік, однак характеризується низькою завадостійкістю до шуму, що призводить до значних похибок обчислювання основної частоти напруги.

У цій роботі запропоновано удосконалення базового методу з метою підвищення точності оцінювання частоти напруги та підвищення завадостійкості методу. Основною відмінністю удосконаленого методу від базового є застосування ковзного усереднення множин набігу фази напруги на зсунутих інтервалах часу їх визначення. Ефективність запропонованого методу підтверджено результатами комп'ютерного моделювання. Вихідні дані моделювання: частота та амплітуда першої гармоніки $f_1 = 50,10$ Гц та $U_1 = 230$ В, частота дискретизації $f_s = 25,6$ кГц, час аналізу $T_a = 0,16$ с, обсяг вибірки напруги $J = 4096$ відліків, кількість вищих гармонік $H = 6$ порядку 2, 4, 5, 7, 9 та 12 з амплітудами $U_2 = 4,6$ В, $U_4 = 2,3$ В, $U_5 = 13,8$ В, $U_7 = 11,5$ В, $U_9 = 3,45$ В та $U_{12} = 1,15$ В, СКВ шуму $\sigma_\xi = 2$ В.

Модель напруги електропостачання загальної призначеності у дискретній формі з врахуванням вищих гармонік та широкосмугового шуму має такий вигляд [2]:

$$u[n] = U_1 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n - \varphi_1\right) + \sum_{h=2}^H U_h \sin\left(2\pi h \frac{f_1}{f_s} n - \varphi_h\right) + \xi(n) = U[n] \sin \Phi[n], \quad n = \overline{1, N}, \quad N = [T_a f_s]^+, \quad U_1 \gg U_h, \quad (1)$$

де U_1, f_1, φ_1 – відповідно амплітуда, частота та початкова фаза 1-ої гармоніки, а U_h та φ_h – відповідно амплітуда та початкова фаза h -тої гармоніки, T_a – час аналізу сигналу, $U[n], \Phi[n]$ – відповідно обвідна та фаза напруги, ξ – реалізація гаусового шуму з нульовим математичним сподіванням і дисперсією σ_ξ^2 .

Застосування ДПГ до напруги (1) дає змогу отримати дві складові: послідовності відліків напруги $u[n]$ та її Гільберт образу $\tilde{u}[n]$ на основі яких розраховується дискретна фазова характеристика (ДФХ) напруги $\Phi[n]$ [2], яка визначається через функцію $\arctg$ відношення $\tilde{u}[n]/u[n]$ із усуненням стрибків значень ДФХ в точках розриву цієї функції.

Оцінювання основної частоти напруги електромережі базовим методом проводиться за такою формулою [1]:

$$f_1 = \frac{f_s}{2\pi} \cdot \frac{\Phi(n_2) - \Phi(n_1)}{(n_2 - n_1)} = \frac{f_s}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\Phi}{(n_2 - n_1)}, \quad n_1, n_2 \in [2, N]. \quad (2)$$

Для покращення результату оцінювання основної частоти до ДФХ напруги застосовується ковзне усереднення m набігів фази виду $(\Phi[n_2] - \Phi[n_1])$ на зсунутих інтервалах часу величиною $(n_2 - n_1)/f_s$ (n_1, n_2 – номери відліків ДФХ):

$$\bar{\Phi} = \frac{1}{m} \sum_{i=0}^{m-1} [\Phi[n_2 + i] - \Phi[n_1 + i]], \quad (3)$$

$$\bar{f}_1 = \frac{f_s}{2\pi} \cdot \frac{\bar{\Phi}}{(n_2 - n_1)}, \quad n_1, n_2 \in [2, N]. \quad (4)$$

На рис.1 наведений графік ДФХ з поясненням методу ковзного усереднення. З графіку видно, наприклад, що для $n_1 = 1024, n_2 = 1536$ – $\Phi[n_1] = 11,042$ рад, $\Phi[n_2] = 17,342$ рад, $\Delta\Phi = 6,300$ рад. Усереднення проводилось за 150 значеннями набігу фази ($m = 150$) на інтервалах часу тривалістю 0,02 с. Отримано усереднене значення $\bar{\Phi} = 6,296$ рад.

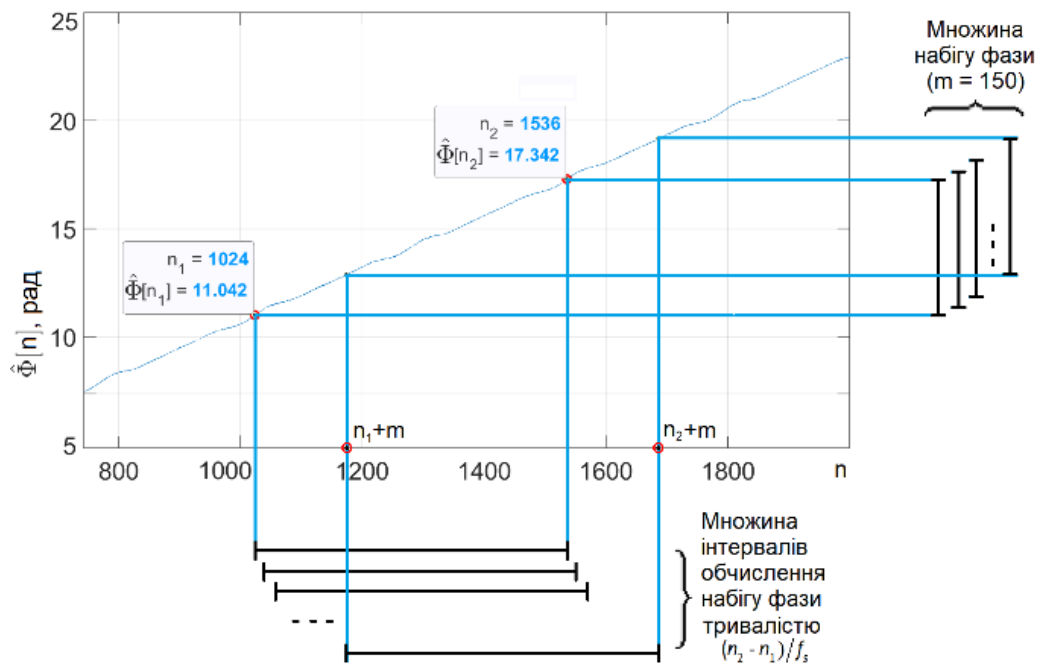


Рис.1. Графік ДФХ та метод її ковзного усереднення

Розрахована основна частота напруги за базовим (2) та удосконаленим методами (4) становить $f_1 = 50,134$ Гц та $\overline{f_1} = 50,102$ Гц відповідно, а абсолютні похибки оцінювання основної частоти – 34 мГц та 2 мГц відповідно.

Удосконалений програмно-алгоритмічний метод оцінювання основної частоти, що ґрунтується на фазовому методі на основі-ДПГ та ковзному усередненні набігу фази напруги, суттєво підвищує точність оцінювання основної частоти напруги за наявності шуму ($\sigma_\xi = 2$ В) порівняно з базовим методом: абсолютна похибка зменшується в 17 раз, що свідчить про ефективність підходу та його придатність для оцінювання характеристик якості електроенергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Malko, V., Kuts, Y., Kovtun, S., & Kuts, V. (2025). The phase method of determining the supply voltage frequency in the tasks of monitoring the power quality indices. In *Materials of the XXVI International Scientific and Practical Conference "Renewable Energy and Energy Efficiency in the XXI Century"*, pp.159–160.
2. Babak, V., Zaporozhets, A., Kovtun, S., Malko, V., Kuts, Y., Fryz, M., & Kuts, V. (2025). Methodology for Assessment the Power Quality Characteristics of the Supply Voltage of General-Purpose Power Grids. In: Babak, V., Zaporozhets, A. (eds) *Systems, Decision and Control in Energy VII. Studies in Systems, Decision and Control*, vol 595 (pp. 25–56). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-90466-0_2.

ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕГРАЦІЇ ФОТОВОЛЬТАІЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ТА СИСТЕМ ГЕНЕРУВАННЯ ВОДНЮ В АВТОМАТИЗОВАНИХ АВТОНОМНИХ СИСТЕМАХ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИКИ

С. Бойченко¹, Б. Яворський², К. Осадчик³, С. Шман⁴, Д. Сябрук⁵

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр-т Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна., тел.: +38(044)204-82-25,
e-mail: chemmotology@ukr.net

Сучасний етап розвитку світової цивілізації характеризується стрімким зростанням потреб в енергоресурсах та одночасним вичерпанням традиційних видів палива. Використання вугілля, нафти та природного газу, які залишаються основою енергетичної системи багатьох країн світу, супроводжується значними екологічними загрозами, викидами парникових газів і посиленням глобальних кліматичних змін, які ми спостерігаємо вже сьогодні. Варто зазначити, що використання традиційних видів палива неминуче спливає – за нинішніми оцінками, запаси нафти можуть вичерпатися вже до 2050-х років, а природного газу – до 2060-го року. Натомість енергія Сонця та Водню, згідно з даними, здатна забезпечувати людство десятиліттями – фотоелектричні панелі зберігають ефективність понад 80-90% навіть через 20-30 років експлуатації, а потенціал виробництва Водню оцінюють у понад тридцять років стабільного використання, що робить їх ключовими джерелами для сталого майбутнього. Особливої актуальності набуває розвиток автономних систем, здатних забезпечувати стабільне електропостачання об'єктів незалежно від централізованих електромереж.

Метою дослідження є теоретичне обґрунтування доцільності інтеграції фотовольтаїчних панелей і систем генерації водню в автоматизовані автономні енергетичні комплекси для підвищення надійності та енергонезалежності електропостачання.

Методика реалізації ґрунтується на аналітичному огляді сучасних технологій сонячної та водневої енергетики, їх порівняльному аналізі за ефективністю, вартістю, тривалістю служби, а також вивченні можливостей їх поєднання в єдину систему.

Результати дослідження довели, що комбінування фотоелектричних установок із електролізерами забезпечує стабільну генерацію енергії, а водень може слугувати ефективним засобом довготривалого зберігання надлишків.

Такий підхід підвищує автономність енергосистем, мінімізує викиди CO₂ і сприяє переходу до відновлюваних джерел. Висновки свідчать, що інтеграція сонячних і водневих технологій є перспективним напрямом розвитку енергетики, який відповідає принципам сталого розвитку та є ключовим чинником енергетичної стійкості України.

Ключові слова: фотовольтаїчні панелі, воднева енергетика, електроліз, відновлювані джерела енергії, автономні системи електропостачання, акумулювання енергії, енергоефективність, автоматизація, сталий розвиток, гібридні енергетичні системи.

PROSPECTS FOR INTEGRATION OF PHOTOVOLTAIC PANELS AND HYDROGEN GENERATION SYSTEMS IN AUTOMATED AUTONOMOUS ELECTRICITY GENERATION SYSTEMS

S. Boichenko¹, B. Yavorsky², K. Osadchyk³, S. Shman⁴, D. Syabruk⁵

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, tel.: +38(044)204-82-25,
e-mail: chemmotology@ukr.net

The study aims to provide a theoretical justification for the integration of photovoltaic panels and hydrogen generation systems into automated autonomous energy complexes to enhance the reliability and energy independence of power supply. The methodology is based on an analytical review of modern solar and hydrogen energy technologies, their comparative analysis in terms of efficiency, cost, and service life, as well as an assessment of the possibilities of their integration into a unified system. The research results show that

combining photovoltaic installations with electrolyzers ensures stable power generation, while hydrogen serves as an effective means of long-term energy storage. This approach increases the autonomy of energy systems, minimizes CO₂ emissions, and contributes to the transition toward renewable energy sources. The conclusions indicate that the integration of solar and hydrogen technologies is a promising direction in energy development, consistent with the principles of sustainable development and a key factor in strengthening Ukraine's energy resilience.

Key words: photovoltaic panels, hydrogen energy, electrolysis, renewable energy sources, autonomous power systems, energy storage, energy efficiency, automation, sustainable development, hybrid energy systems..

ORCID: ¹0000-0002-2489-4980; ²0009-0009-6805-2249

Вступ. Останніми роками сонячна енергетика набула значного розвитку завдяки впровадженню сучасних технічних рішень і технологій, що дозволяють підвищити ефективність і знизити собівартість виробництва електричної та теплової енергії. Важливим чинником стали дієві механізми підтримки сонячної енергетики, які реалізуються у багатьох країнах світу. Основні переваги використання сонячного випромінювання порівняно з органічними видами палива полягають у практично невичерпному джерелі енергії, можливості застосування сонячної радіації як місцевого енергетичного ресурсу на більшій частині території Землі та безпосередньому її перетворенні на електричну чи теплову енергію. До основних способів накопичення енергії належать батарейні комплекси, гідро-акumuлюючі електростанції та теплові сховища. До інноваційних напрямів належить розвиток систем зберігання на базі водню та ванадієвих редокс-акumuляторів (VRFB). Такі технології демонструють значний потенціал у сфері довготривалого накопичення енергії. VRFB-установки забезпечують до 80–90 % ефективності циклу заряду-розряду, що робить їх перспективними для промислового застосування. Водночас водневі сховища енергії розглядаються як ефективне рішення для сезонного зберігання, оскільки дають змогу накопичувати надлишки електроенергії на кілька місяців.

Отже, сучасні рішення для накопичення енергії охоплюють батарейні системи (зокрема літій-іонні), гідроакumuлюючі станції та теплові сховища, кожне з яких має свої переваги й обмеження. Попри досягнутий прогрес, проблеми вартості, тривалості експлуатації та екологічних ризиків залишаються актуальними. Саме тому все більшої уваги набувають інноваційні підходи до довготривалого та сезонного зберігання, серед яких важливе місце посідають технології на основі Водню.

Висновки. Проведене дослідження показало, що інтеграція фотовольтаїчних панелей та систем генерації водню в автоматизовані автономні енергетичні комплекси є перспективним шляхом підвищення енергоефективності, екологічної безпеки та автономності сучасних систем електропостачання. Поєднання сонячної енергетики з водневими технологіями дозволяє компенсувати недоліки кожної з них окремо: нерівномірність сонячної генерації та складність тривалого зберігання енергії.

Розроблення таких гібридних систем відкриває можливості для формування сталих енергетичних кластерів, здатних забезпечувати безперервне постачання електроенергії в умовах обмеженого доступу до централізованих мереж. Запровадження систем моніторингу й автоматизованого керування підвищує ефективність використання енергоресурсів, знижує втрати та забезпечує оперативне реагування на зміни зовнішніх умов.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку моделей спільної роботи фотоелектричних установок та електролізерів, розроблення методів оптимізації режимів накопичення і споживання енергії, а також удосконалення алгоритмів автоматизованого керування. Перспективним напрямом є створення цифрових двійників енергетичних систем для прогнозування їхньої поведінки в реальному часі, а також застосування штучного інтелекту для підвищення точності прогнозування та оптимізації витрат енергії.

DECENTRALIZED MANAGEMENT OF LOW-VOLTAGE NETWORKS WITH DISTRIBUTED PV GENERATION

Mukhlisakhon Begmatova

Fergana State Technical University,

phone: (+99893) 555-25-75, e-mail: muxlisa_begmatova@mail.ru

The paper examines the features of the integration of PV systems into low-voltage networks and suggests an approach to voltage regulation based on inverter control. The method is based on a theoretical analysis of network modes and modeling of power distribution. It is shown that the use of control algorithms makes it possible to increase voltage stability and reliability of power supply

Key words: photovoltaic systems, low-voltage networks, distributed generation, voltage regulation, electricity quality

ORCID: 0000-0003-4405-4943.

The integration of distributed photovoltaic generation into low-voltage networks leads to qualitative changes in their operating modes. Unlike traditional radial networks with one-way power flow, modern networks are characterized by the presence of multiple energy sources connected at the consumer level. This leads to the emergence of modes with reverse power flows and increased voltage sensitivity to generation changes.

The voltage change in the network node is determined by the ratio:

$$\Delta U \approx \frac{R * P + R * Q}{U}$$

where R and X are the line parameters, and P and Q are the active and reactive node capacities. In conditions of low-voltage networks, the contribution of active power is decisive, which is due to the relatively high value of the active resistance of the lines. With an increase in the generation of a photovoltaic system, there is an increase in voltage in the node, especially during periods of low consumption.

Unlike centralized control methods that require global information about the state of the network, the decentralized approach is based on the use of local voltage and power measurements. Each node of the network functions as an autonomous control element that makes decisions based on current parameters.

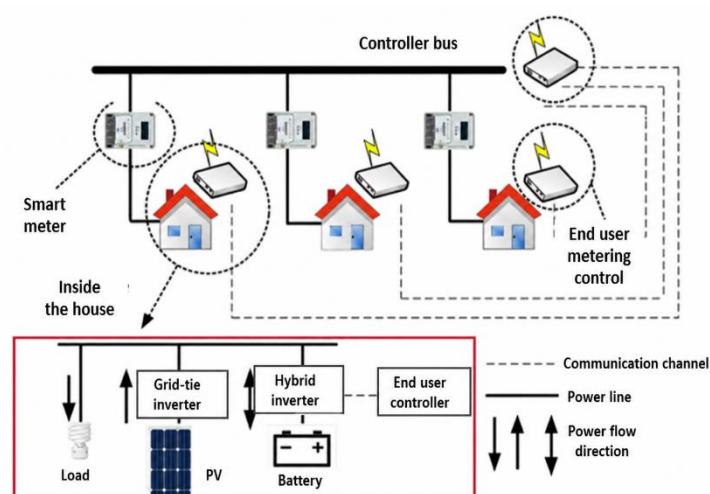
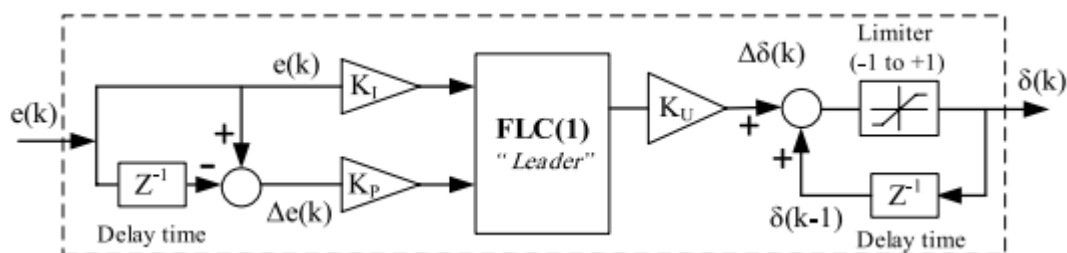


Fig. 1. The structure of a decentralized low-voltage network with PV

The scheme reflects the architecture of a low-voltage distribution network with distributed photovoltaic generation. The network nodes are connected to a common bus and contain PV modules, inverters, smart meters, and local controllers. The transmission of electrical energy is carried out via power lines, while the exchange of control information is carried out through communication channels. Elements of energy generation, storage, and consumption are represented inside each node. A characteristic feature is decentralized decision-making, in which modes are managed at the end-user level.

Control action	Controlled parameter	Direction of impact	Effect at the network node
Active power curtailment	(P)	↓	Voltage reduction
Reactive power absorption	(Q < 0)	↓	Voltage reduction
Reactive power generation	(Q > 0)	↑	Voltage increase
Energy storage utilization	Power balance	redistribution	Voltage fluctuation smoothing
Local algorithm adaptation	(P, Q)	dynamic	Operating mode stabilization



The diagram represents the structure of a decentralized intelligent control algorithm based on a fuzzy logic controller. The input signal $e(k)$ corresponds to the voltage deviation at the current time step, while $\Delta e(k)$ represents its rate of change, obtained using a delay element.

The presented structure enables adaptive control of inverter parameters using only local information about voltage conditions. By incorporating both the magnitude and the rate of voltage deviation, the algorithm provides a dynamic response to rapid changes in generation and load. The integration of such intelligent controllers into each node of the network ensures coordinated yet decentralized regulation, contributing to voltage stabilization without centralized supervision.

The application of decentralized intelligent control algorithms allows effective regulation of inverter operating modes and mitigation of voltage deviations in low-voltage networks with high penetration of photovoltaic generation. The proposed approach ensures adaptive and stable network operation under variable generation conditions.

1. Ahmed M. M. Nour, Ahmed A. Helal, Magdi M. El-Saadawin and Ahmed Y. Hatatan "Voltage imbalance mitigation in an active distribution network using decentralized current control" Protection and Control of Modern Power Systems (2023) 8:20 , <https://doi.org/10.1186/s41601-023-00293-y>
2. B. M. Mutalibjon, K. Anarkhan, and K. Ilkhombek, "Modeling a photovoltaic system with a bidirectional DC-DC converter in MATLAB/Simulink based on fuzzy logic," in 2025 International Conference on Emerging Technologies in Electronics, Computing, and Communication (ICETEECC), Apr. 2025, pp. 1–6, doi: 10.1109/ice-tecc65365.2025.11070251.
3. I. Kholiddinov and M. Begmatova, "Elimination of asymmetry in low voltage electrical networks using solar panels" in IV International Scientific and Technical Conference "Actual Issues of Power Supply Systems": ICAIPSS2024, 2025, vol. 3331, p. 30108, doi: 10.1063/5.0307203.

EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS FOR INTERPRETING NEURAL NETWORK MODELS IN ELECTRICITY GRID LOAD FORECASTING

S. I. Shapovalova¹, V. M. Titov²

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",

37, Prospect Beresteyskyi, Kyiv, Ukraine, 03056

Phone: (095) 028-19-70, e-mail: 19Titov.vlad.Titov19@gmail.com

This paper presents a systematic review of Explainable Artificial Intelligence (XAI) methods applicable to neural network-based electricity load forecasting for the Unified Power System (UPS) of Ukraine. Five classes of post-hoc and intrinsic interpretability techniques are analysed: SHAP, LIME, Integrated Gradients, Permutation Importance, and Attention Visualisation. Their applicability to LSTM, Temporal Fusion Transformer, and Chronos architectures is evaluated with respect to computational cost, locality of explanations, and model-agnosticism.

Key words: *explainable AI, SHAP, LIME, Integrated Gradients, load forecasting, neural networks, Unified Power System of Ukraine.*

ORCID: ¹0000-0002-3431-5639; ²0009-0000-5780-5596.

Electricity consumption forecasting constitutes a fundamental task in the operational management of Ukraine's Unified Power System (UPS). Machine learning models serve as a core instrument for analysing traffic and load patterns in networks incorporating energy facilities [1]. In a previous study [2], a comparative analysis of three architectures LSTMSeq2Seq, Temporal Fusion Transformer (TFT), and Chronos-T5 Large was conducted using UPS data for 2017-2021 with 12 input parameters (consumption, generation by source type, temperature, and calendar indicators). On a 168 hour forecast horizon, Chronos achieved a MAPE of 3.11%, followed by LSTM (3.46%) and TFT (3.78%). However, these models function as "black boxes": the dispatcher receives a forecast with no insight into which input parameters the model prioritises when forming its prediction. This problem is particularly critical in the energy sector, where model transparency is a prerequisite for dispatcher trust, regulatory auditing, and well-founded model parameter optimisation [3].

Building upon the limitations identified in the preceding study [2], the aim of this work is to systematise and evaluate Explainable AI (XAI) methods with respect to their applicability to short-term load forecasting tasks for Ukraine's UPS, with the goal of enhancing the transparency and justifiability of forecasting decisions.

A comprehensive review [3] spanning eight publication portals identifies dominant XAI approaches in load forecasting: Feature Importance and Attention mechanisms. In [4], SHAP is employed not merely for post-hoc analysis but as a tool for targeted feature engineering in mid-term load forecasting for ERCOT, yielding an XGBoost MAPE of 0.79%. The work in [5] demonstrates that Deep SHAP-based feature selection reduces training time by 3.98% and NRMSE by 8.11% for an Encoder-Decoder model in heating load forecasting. The study in [6] combines LIME and Permutation Importance for local interpretation of electrical load forecasts, while [7] demonstrates the efficacy of a dual attention mechanism in a BiLSTM model for enhancing forecast interpretability during heatwave events.

Based on the conducted literature review, five classes of XAI methods applicable to electricity load forecasting have been systematised.

SHAP (Shapley Additive Explanations) is a method grounded in Shapley values from cooperative game theory [8] that quantifies the contribution of each feature to an individual prediction with theoretical guarantees of local accuracy, consistency, and additivity. For tree-based models (LightGBM, XGBoost), the Tree SHAP algorithm operates in $O(TLD^2)$ time; for deep neural networks (LSTM, TFT), Deep SHAP and Gradient SHAP approximate Shapley values via backpropagation. SHAP provides both local explanations (for an individual forecast) and a global picture of feature importance through sample-level aggregation. In the context of [2], SHAP enables the determination of whether temperature, NPP generation, or calendar indicators are the most influential factors for load forecasting across different horizons [4, 8].

LIME (Local Interpretable Model-agnostic Explanations) is a model-agnostic method [9] that constructs a local linear surrogate model around a specific prediction by perturbing the input data. Its advantage lies in its independence from the model architecture and the intuitive interpretability of results; however, the stability of explanations depends on the perturbation strategy, which may limit reproducibility for time series [6, 9].

Integrated Gradients (IG) is a gradient-based attribution method specifically designed for differentiable models [10]. It computes the contribution of each input parameter by integrating gradients along a straight-line path from a baseline

input to the actual input, satisfying the axioms of sensitivity and implementation invariance. The method is particularly relevant for LSTM and TFT, where it enables the visualisation of the influence of specific time steps on the forecast.

Permutation Importance (PI) is the simplest model-agnostic approach, estimating feature influence by measuring the decline in a quality metric upon random shuffling of the feature's values. It requires no access to the model's internal structure and scales readily to any architecture [6]. However, PI provides only a global estimate and does not account for inter-feature interactions, which limits its applicability to highly correlated climatic features.

Attention Visualisation is an intrinsic interpretability method embedded in transformer-based architectures. TFT incorporates a Variable Selection Network that assigns importance weights to variables, while PatchTST employs Self-Attention to identify critical time steps. Nevertheless, the interpretation of attention weights as causal attribution remains a subject of ongoing debate [3, 7].

A comparative analysis of the reviewed methods allows for the formulation of recommendations regarding their application to the models investigated in [2]. SHAP is the most versatile method, capable of operating with all three models (LSTMSeq2Seq, TFT, Chronos), thereby providing a uniform scale for comparing feature contributions. Tree SHAP is computationally efficient for boosting-based models, whereas Deep SHAP requires considerably greater resources for LSTM and TFT but provides theoretically grounded attribution. LIME and PI are most appropriately employed as complementary methods for cross-validating SHAP results, particularly across different forecast horizons (ranging from 6 to 168 hours). Integrated Gradients and Attention Visualisation are specialised tools for deep neural networks and can reveal which specific time steps (lags) are most informative for UPS load forecasting. In particular, for the task described in [2], SHAP analysis is expected to determine the relative significance of temperature, NPP/TPP generation, and calendar indicators across different forecast horizons [5, 7].

In summary, five classes of Explainable AI methods SHAP, LIME, Integrated Gradients, Permutation Importance, and Attention Visualisation have been systematised and evaluated with respect to their applicability to UPS load forecasting for Ukraine. SHAP has been identified as the most versatile approach for cross-model comparison of feature contributions across the LSTMSeq2Seq, TFT, and Chronos architectures, while LIME, PI, IG, and Attention are most suitably employed as complementary cross-validation tools.

A promising direction for further research is the experimental verification of SHAP-driven feature selection and its impact on forecast quality across horizons from 6 hours to 168 hours for the UPS of Ukraine.

REFERENCES

1. Shapovalova S., Matiakh S., Titov V. Determination of network traffic anomalies in a distributed computer system with energy facilities. *Vidnovluyana Energetika*, 2024, no. 2(77), pp. 52–57. DOI: 10.36296/1819-8058.2024.2(77).52-57.
2. Shapovalova S. I., Titov V. M. Forecasting electricity consumption in Ukraine based on neural network approaches. *Proc. IX Int. Sci.-Tech. Conf. "Computer Modelling and Optimisation of Complex Systems" (CMOCS-2025)*, November 5–7, 2025, pp. 224–225.
3. Baur L., Ditschuneit K., Schambach M. et al. Explainability and Interpretability in Electric Load Forecasting Using Machine Learning Techniques – A Review. *Energy and AI*, vol. 16, 2024, Art. no. 100358.
4. Wu Y., Wang J., Zhang T. An explainable framework for multi-energy load forecasting using LSTM and SHAP. *Applied Energy*, vol. 310, 2022, Art. no. 118492.
5. Neubauer A., Baur L., Braun M. Explainable multi-step heating load forecasting: Using SHAP values and temporal attention mechanisms for enhanced interpretability. *Energy and AI*, vol. 20, 2025, Art. no. 100336.
6. Grzeszczyk T. A., Grzeszczyk M. K. Justifying Short-Term Load Forecasts Obtained with the Use of Neural Models. *Energies*, vol. 15, no. 5, 2022, Art. no. 1852. DOI: 10.3390/en15051852.
7. Ren J. et al. Interpretable short-term electricity load forecasting considering small sample heatwaves. *Applied Energy*, vol. 398, 2025, Art. no. 126417.
8. Lundberg S. M., Lee S.-I. A unified approach to interpreting model predictions. *Proc. 31st Conf. Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2017)*, pp. 4768–4777.
9. Ribeiro M. T., Singh S., Guestrin C. "Why Should I Trust You?": Explaining the Predictions of Any Classifier. *Proc. 22nd ACM SIGKDD Conf.*, 2016, pp. 1135–1144.
10. Sundararajan M., Taly A., Yan Q. Axiomatic Attribution for Deep Networks. *Proc. 34th ICML*, 2017, pp. 3319–3328.

АЛЬТЕРНАТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ОЦІНКА ЇХ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ**А.О. Янюк¹, В.В. Федонюк¹, А.Г. Євтух¹, М.А. Федонюк¹**

¹Луцький національний технічний університет
вул. Львівська, 75, м. Луцьк, 43018, Україна,
тел.: (050)760-98-51, e-mail: ecolutsk@gmail.com

Було здійснено ґрунтовний аналіз сучасних альтернативних джерел водозабезпечення та передових технологій очищення води, які є елементом підтримання водної безпеки в умовах обмеженості якісних водних ресурсів і нестабільної роботи централізованих систем водопостачання в Україні. Впровадження артезіанських свердловин, систем збору дощової води та децентралізованих рішень дозволяє суттєво підвищити автономію окремих об'єктів і знизити залежність від центральних мереж. Особливе значення мають такі технології очищення води, таких як зворотний осмос, ультрафіолетова дезінфекція, мембранна фільтрація та біологічні методи. Комплексне використання багатоступеневих систем забезпечує високу якість води, яка відповідає актуальним санітарно-гігієнічним вимогам та міжнародним стандартам. Проведений економічний аналіз підтвердив, що попри значні капітальні витрати на обладнання, дані альтернативні системи демонструють економічну вигідність у тривалій перспективі завдяки зниженню вартості експлуатації та покращенню стабільності водозабезпечення. Таким чином, впровадження альтернативних джерел водопостачання та прогресивних методів очищення води є перспективним напрямком для модернізації систем водокористування в Україні. Запропоновані рекомендації можуть слугувати базою для розробки стратегій підвищення сталості та безпеки водопостачання як на рівні громад, так і в більш широкому масштабі..

Ключові слова: водна криза, чиста вода, водопостачання, водозабезпечення, альтернативні технології водопостачання.

ALTERNATIVE WATER SUPPLY TECHNOLOGIES AND ASSESSMENT OF THEIR ENERGY EFFICIENCY**A.O. Yanyuk¹, V.V. Fedonyuk¹, A.G. Yevtukh¹, M.A. Fedonyuk¹**

¹Lutsk National Technical University,
St. Lvivska, 75, Lutsk, 43018, Ukraine,
phone: (050)760-98-51, e-mail: ecolutsk@gmail.com

A thorough analysis of modern alternative sources of water supply and advanced water purification technologies was carried out, which are an element of maintaining water security in conditions of limited high-quality water resources and unstable operation of centralized water supply systems in Ukraine. The introduction of artesian wells, rainwater collection systems and decentralized solutions allows to significantly increase the autonomy of individual facilities and reduce dependence on central networks. Of particular importance are such water purification technologies as reverse osmosis, ultraviolet disinfection, membrane filtration and biological methods. The integrated use of multi-stage systems ensures high water quality, which meets current sanitary and hygienic requirements and international standards. The conducted economic analysis confirmed that despite significant capital costs for equipment, these alternative systems demonstrate economic profitability in the long term due to reduced operating costs and improved water supply stability. Thus, the introduction of alternative sources of water supply and progressive methods of water purification is a promising direction for the modernization of water use systems in Ukraine. The proposed recommendations can serve as a basis for the development of strategies to increase the sustainability and security of water supply both at the community level and on a wider scale..

Key words: water crisis, clean water, water supply, water supply, alternative water supply technologies.

ORCID: ¹0000-0002-1880-6710; ¹0000-0002-4034-3695.

Великим викликом сучасності є глобальна водна криза. Основа життя на Землі – це вода, H_2O . Але у XXI ст. людство зіткнулося із загрозою, яку класифікують як глобальну водну кризу. Дана проблема охоплює всі континенти та стосується мільйонів людей, а також суттєво впливає на стан екосистем та природних комплексів

Початково основною причиною формування проблем у галузі водозабезпечення в Україні були природні чинники, серед яких – сучасні зміни клімату, як відмічено у працях Гафурової О.В., Новак Т.С., Голуба С.М. [1]. В останні роки до них додалася війна та її наслідки. Як зазначено у дослідженнях Мерленка І.М., Федонюк В.В., Мерленко Н.О., Федонюка М.А., Линюка Р.В., Ковальчук Н.С. [2, 3], сучасні зміни клімату в Україні суттєво впливають на стан водних ресурсів, водозабезпечення та водокористування. У роботах Фесюка В.О., Федонюк В.В., Гусар О.Н., Іванціва В.В., Федонюка М.А. [4, 6, 7] було розглянуто зміни режиму опадів у регіоні Північно-Західного Полісся та їх потенційний вплив на водні ресурси. Потенційно такі зміни можуть бути відслідковані з використанням методів ДЗЗ, про що зазначали Федонюк В.В., Федонюк М.А. [5], що також є актуальним для нашого часу.

Метою даного дослідження був аналіз особливостей, чинників і передумов однієї з глобальних екологічних проблем сучасності – проблеми забезпечення якісною питною водою, проявів даної проблеми у світі та в Україні та можливих шляхів її подолання шляхом застосування методів альтернативного водозабезпечення регіонів та окремих громад.

Об'єктом дослідження виступали водні ресурси та їх раціональне використання. Предметом дослідження були сучасний екологічний стан забезпечення чистою питною водою людей у світі та в Україні і перспективи покращення і стабілізації цього стану. Методи дослідження, що використовувалися в роботі: аналітичний, порівняльно-оцінковий, картографічний, описовий, статистично-математичний, графічний.

Матеріали дослідження: власні напрацювання авторів у галузі розробки, впровадження та удосконалення методів альтернативного водозабезпечення. Для теоретичної оцінки та аналізу стану проблеми було проаналізовано дослідження [1,2,3,4,5,6,7].

Практичне значення: результати дослідження і розроблені пропозиції та рекомендації можуть бути використані при плануванні заходів щодо оптимізації та стабілізації водозабезпечення у тих районах, де ці проблеми є гострими. та в інших галузях.

На основі всебічного аналізу технічних рішень та методів у сфері альтернативного водопостачання авторами було здійснено оцінку енергоефективності окремих методів. Оцінка проводилася в балах, згідно розробленої методики. Враховувалися такі показники: складність та вартість методу та конструкцій відповідних установок; доступність методу; локалізація методу і логістика.

Наведемо основні результати:

Оцінка методів та технологій альтернативного водозабезпечення щодо їх енергоефективності:

1. Артезіанські свердловини: 2-4 бали.
2. Збір та очищення дощової води: 4-5 балів.
3. Децентралізовані системи (використання локальних водних об'єктів): 3-5 балів.

Оцінка альтернативних технологій очищення води щодо їх енергоефективності:

1. Зворотній осмос: 2 – 3 бали.
2. УФ – дезинфекція: 1 – 2 бали.
3. Мембранна фільтрація: 4 – 5 балів.
4. Біологічні методи: 3 – 4 балів.

Відмітимо, що енергоефективність є вищою при низьких балах відносної оцінки методу або технології.

Одержані результати та висновки:

- 1) Всебічний аналіз проблеми дефіциту та якості питної води показує, що вона є однією з головних глобальних і національних загроз сучасності;
- 2) Водна криза є комплексною проблемою, спричиненою багатьма факторами, зокрема зростанням чисельності населення, змінами клімату, забрудненням водних ресурсів та нераціональним використанням води. Вже сьогодні ця проблема переростає у виклик для міжнародної безпеки та сталого розвитку, а прогнозоване подальше загострення дефіциту води лише підкреслює її важливість;

- 3) Україна, хоча й володіє значними запасами прісної води, також знаходиться в зоні ризику, що потребує особливої уваги до стану водних ресурсів та їх управління. Питання забезпечення питною водою в Україні мають системний характер. Нерівномірність розподілу водних ресурсів по території країни, значний рівень зносу інфраструктури, забруднення поверхневих і підземних вод, недоліки в реалізації нормативно-правових вимог, а в останні роки – військові дії – суттєво ускладнюють доступ до якісної питної води для великої частини населення України;
- 4) Широкомасштабна війна суттєво посилила ці проблеми, викликавши руйнування водогонів та гідротехнічних споруд, особливо відчутне у південних та східних регіонах країни (Донецька, Миколаївська, Херсонська області). Відсутність або ускладнений доступ до безпечної води створюють серйозну загрозу здоров'ю людей і потребують швидких та комплексних дій;
- 5) Впровадження альтернативних джерел водопостачання та сучасних технологій очищення води має значний потенціал для зміцнення водної безпеки. Такі рішення, як децентралізація систем, використання артезіанських свердловин, збір дощової води та багатоступеневе очищення, дають змогу забезпечити високу якість води навіть за умов нестабільної роботи централізованих систем. Попри значні стартові витрати, саме такі підходи є економічно виправданими у довгостроковій перспективі.

ПОСИЛАННЯ

1. Гафурова О. В., Новак Т. С., Голуб С. М. Проблеми забезпечення права населення на доступ до інформації про якість питної води. Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Право. Ужгород: № 1 (79), 2023. С. 356 – 361. URL: <http://visnyk-pravo.uzhnu.edu.ua/article/view/288634>
2. 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.
3. 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. Сільськогосподарські науки. Рівне: 2019. № 2 (86). С. 124 – 134. DOI: <https://doi.org/10.31713/vs2201912> URL: <http://visnyk.nuwm.edu.ua/index.php/agri/article/view/781>
4. Федонюк В.В., Гусар О.Н., Федонюк М.А. Динаміка хмарності в межах Волинської області в період 2010-2021 рр. Український журнал природничих наук. Житомир: № 4, 2023. С. 86 – 95. URL: <https://journals.univ.zhitomir.ua/index.php/ujns/article/view/40> DOI: <https://doi.org/10.32782/naturaljournal.4.2023.10>
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. Fedoniuk M.A., Fedoniuk V.V., Ivantsiv V.V. Possibilities for improvement of environmental monitoring of precipitation in the city (a case of Lutsk). Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Геологія. Географія. Екологія». Харків: 2019. Вип. 50. С. 210 – 219. URL: <http://journals.urau.ua/geoeo/article/view/204884> DOI: <https://doi.org/10.26565/2410-7360-2019-50-16>
7. Fedoniuk V., Fesyuk V., Fedoniuk M. Analysis of the dynamics and precipitation regime in the cross-border region Poland-Belarus-Ukraine (2010-2018). Journal of Geology, Geography and Geoecology. Dnipro: 2023. № 32 (2). P. 241 – 253. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.15421/112323>

SYNTHESIS OF SnO_2 METAL OXIDE FILMS AND THEIR SENSITIVITY TO VARIOUS GASES

Usarov Khamidillo Saydullo ugli

Associate Professor, Andijan Branch, Kokand University, PhD in Technical Sciences
e-mail: fizxamidullo91@mail.ru

ORCID: 0009-0007-5590-9755

Abstract: In this study, a tin dioxide (SnO_2)-based metal oxide film was deposited on a silicon (Si) substrate using the spray-pyrolysis technique of the sol-gel method. The influence of isothermal annealing on the structural and electrical properties of the obtained films was investigated, demonstrating that this treatment enhances the operational stability of the sensor. For SnO_2 metal oxide materials, the most critical and informative parameter is electrical conductivity (or resistivity), as even small variations in the analyzed gas concentration cause significant changes in the film's electrical resistance. The results indicate that SnO_2 -based gas sensors exhibit high sensitivity to gases such as hydrogen sulfide (H_2S), freons, ethanol vapors, chlorine vapors, and hydrogen (H_2). For these gases, the sensors' sensitivity, operating temperature, and electrical characteristics were determined, allowing an assessment of their potential practical applications. The findings demonstrate that SnO_2 metal oxide films are promising candidates as gas-sensing elements for environmental monitoring and industrial safety systems.

Keywords: SnO_2 metal oxide, sol-gel, film, sensor, ethanol, isopropyl alcohol

1. Introduction. In recent years, interest in gas sensors based on metal oxide semiconductors has increased significantly. Among these materials, tin dioxide (SnO_2) stands out due to its high chemical stability, wide bandgap energy, and high sensitivity to various gases. SnO_2 -based sensors are widely used in environmental monitoring, industrial safety, medical applications, and consumer electronics [1–2].

SnO_2 metal oxide films can be fabricated using various physical and chemical methods. The most commonly employed techniques include sol-gel processing, chemical vapor deposition (CVD), physical vapor deposition (PVD), sputtering, spin-coating, and spray-pyrolysis. Films obtained by these methods exhibit significant differences in thickness, grain size, and surface morphology. In particular, the sol-gel and spray-pyrolysis methods attract considerable attention in practical applications due to their low cost and technological simplicity. The microstructure and surface area of the films directly affect the adsorption of gas molecules, which in turn enhances the sensor's sensitivity [3–4].

SnO_2 is an n-type semiconductor, and its gas sensitivity is primarily explained by adsorption and desorption processes occurring at its surface. In air, oxygen molecules adsorb onto the SnO_2 surface, capturing free electrons and increasing the resistance near the surface. When reducing gases such as CO , H_2 , CH_4 , NH_3 , and others are introduced, they react with the adsorbed oxygen ions, returning electrons to the semiconductor. This results in a decrease in the electrical resistance of the SnO_2 film. Conversely, oxidizing gases such as NO_2 and O_3 capture additional electrons, causing the resistance to increase.

Due to the high sensitivity of SnO_2 films' electrical conductivity to changes in the surrounding gas composition, the development of metal oxide-based gas sensors emerged as a research direction. The first metal oxide gas sensor was developed by Taguchi in Japan in 1964, and its industrial-scale production continues today under Figaro Ltd. (Japan). TGS (Taguchi Gas Sensor) series sensors, manufactured by Figaro Ltd., feature a plastic housing equipped with a protective mesh against explosions. The sensors have four output pins: two for the heater and the remaining two for monitoring the electrical resistance of the sensing element.

These TGS sensors are based on SnO_2 and are widely used for detecting flammable gases in the air (e.g., propane, butane, ethanol, hydrogen) as well as toxic gases such as carbon monoxide, ammonia, sulfur dioxide, and others. Since methane is the primary component of natural gas, gas sensors are recommended to be installed in the basements of buildings to detect gas leaks. According to Japanese safety regulations, the installation of sensors to monitor natural gas leaks is mandatory in the basements of buildings with high occupancy. Currently, millions of gas sensors operate continuously in safety systems in Tokyo alone.

Tin dioxide (SnO_2) crystallizes in a rutile-type tetragonal structure and is one of the most stable compounds in the Sn–O system. In its structure, Sn^{4+} cations are surrounded by oxygen atoms forming octahedra (SnO_6), while O^{2-} anions occupy the centers of O– Sn_3 triangles. The crystal structure can be visualized as chains of edge-sharing SnO_6 octahedra, where

the chains are connected at the octahedral vertices. The tetragonal unit cell parameters of SnO_2 are: $a = b = 4.7374 \text{ \AA}$, $c = 3.1864 \text{ \AA}$ [5].

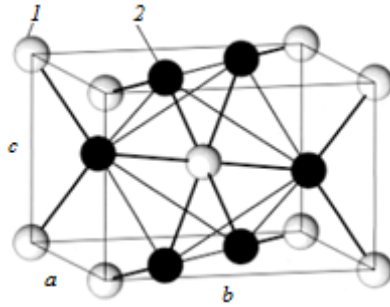


Figure 1. Crystal lattice of rutile-type tin dioxide (SnO_2) [5]: 1 – tin atom; 2 – oxygen atom; $a = b \neq c$

II. Physical Properties of Tin Dioxide (SnO_2) Metal Oxide Films. The physical properties of polycrystalline metal oxide semiconductor films depend on their fabrication method, growth parameters, the presence of dopants, substrate material, and the type of gas environment. Additionally, post-deposition thermal treatments significantly influence the films' electrophysical properties. According to [6], thin SnO_2 films ($\sim 1.5 \text{ \mu m}$ thick) prepared by spray deposition of SnCl_4 in ethanol exhibit a resistivity of approximately $154 \text{ \Omega}\cdot\text{cm}$ in the undoped state and $\sim 50 \text{ \Omega}\cdot\text{cm}$ when doped with antimony, while the optical transmittance is $\sim 68.2 \%$. SnO_2 layers are characterized by high optical transmittance, typically 80–90 %. As a substrate, K8 colorless optical glass provides over 90 % transparency. The light absorption ranges between 10–20 %, and the optical transmittance increases significantly as the film thickness decreases. For films with thicknesses of 0.07–0.09 $\text{\mu m}$, the average optical transmittance reaches 81–83 %. SnO_2 is transparent in the visible region and reflects infrared radiation with wavelengths greater than 2 $\text{\mu m}$. Based on the optical transmittance spectra, the absorption coefficient can be determined, allowing the evaluation of optical transitions, bandgap energy, and the film's stoichiometry.

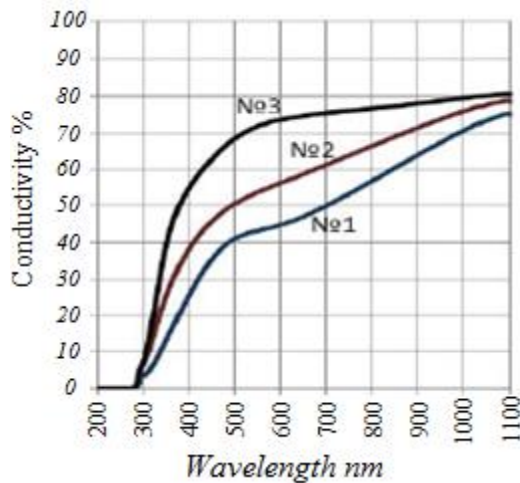


Figure 2. Optical transmittance spectra of SnO_2 samples №1, №2, and №3 after isothermal annealing at 300 °C for 1 hour.

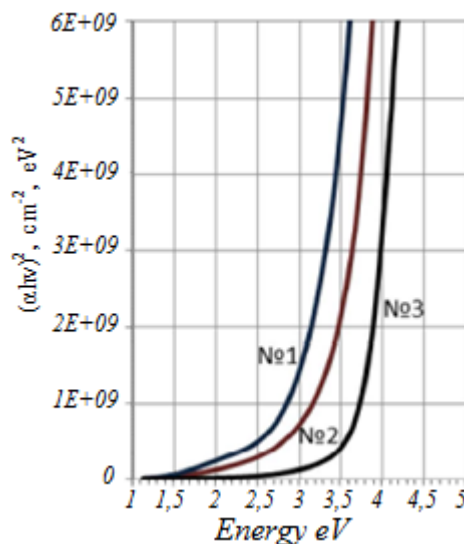


Figure 3. Dependence of $(\alpha h\nu)^2$ on photon energy for SnO_2 samples №1, №2, and №3.

SnO_2 films were prepared using the sol–gel technique. To obtain the sol, 5 g of $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ was dissolved in 25 ml of isopropyl alcohol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}$) and stirred with a magnetic stirrer (IKA RH basic 2) at 100 °C for 20 minutes [7].

Using the sol–gel method, three SnO_2 film samples were prepared:

1. Sample №1 – after 8 hours, the solution remained in a sol state.
2. Sample №2 – after 10 hours, the solution began thickening.
3. Sample №3 – after 12 hours, the solution became a milky, viscous gel.

All samples were subsequently subjected to isothermal annealing at 300 °C for 1 hour. The optical transmittance spectra (Figure 2) indicate that Sample №3, prepared from the gel state, exhibits higher transparency compared to Samples №1 and №2, which had not yet fully gelled. The visible light transmittance of Sample №3 reaches 75 %.

Tin dioxide (SnO_2) is a direct-bandgap semiconductor. For direct allowed transitions, the absorption coefficient α is expressed as a function of photon energy, i.e., $\alpha = f(h\nu)$. In such cases, the plot of $(\alpha h\nu)^2$ versus $h\nu$ is linear over a certain range. By extrapolating this linear region to intersect the abscissa, the bandgap energy (E_g) can be determined.

Figure 3 shows the dependence of $(\alpha h\nu)^2$ on photon energy for SnO_2 samples №1, №2, and №3. Based on these data, the bandgap energies are as follows:

- Sample №1: $E_g \approx 3.0$ eV
- Sample №2: $E_g \approx 3.3$ eV
- Sample №3: $E_g \approx 3.7$ eV

The bandgap value of Sample №3 is closest to the true value of SnO_2 at room temperature. The lower E_g values for Samples №1 and №2 are attributed to oxygen non-stoichiometry arising during different stages of sol-gel film formation. Additionally, the electrical resistivity, carrier mobility, and free charge carrier concentration of the sol-gel-prepared SnO_2 films were measured, and the results are summarized in Table 1.

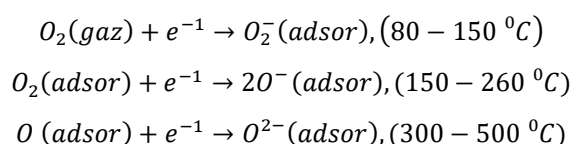
Table 1. Results of measurements of resistivity, carrier mobility, and free charge carrier concentration.

Sample number	R_s , k Ω	ρ , $\Omega \cdot \text{cm}$	μ , $\text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$	n , cm^{-3}
1	223,19	22,32	37,9	$7,39 \cdot 10^{15}$
2	294,32	29,43	61,69	$3,44 \cdot 10^{15}$
3	947,93	142,19	54,07	$8,13 \cdot 10^{14}$

Studies show that the electrical resistivity of SnO_2 samples synthesized before gelation (Samples №1 and №2) is relatively low, whereas the gel-based Sample №3, which exhibits the highest optical transparency, has a significantly higher resistivity. The surface electrical resistivity of SnO_2 films as a function of temperature was investigated, revealing that, regardless of the synthesis method, the resistivity is governed by two primary mechanisms (Figure 4) [8]:

1. First mechanism (150–200 °C): This regime is characteristic of semiconductors and is determined by the ionization of shallow donor states. As a result, the electrical resistivity decreases exponentially with increasing temperature.
2. Second mechanism (200–400 °C): In this range, the increase in resistivity is associated with oxygen vacancies in the film and the adsorption of oxygen from the atmosphere. The adsorbed oxygen captures electrons, leading to an increase in electrical resistivity.

SnO_2 is an n-type semiconductor with a wide bandgap, and its conductivity is mainly determined by oxygen vacancies in the crystal structure. These vacancies act as desorption centers for atmospheric oxygen. Depending on the temperature, the adsorbed oxygen on the SnO_2 surface can exist in different ionic forms — O_2^- , O^- , and O^{2-} — and the transitions between these forms are governed by specific temperatures and chemical reactions.



Adsorbed oxygen on the surface of tin dioxide (SnO_2) captures electrons from donor levels, leading to a reduction of electrons in the surface layer. As a result, the surface states become depleted, which causes an increase in the electrical resistivity of the films.

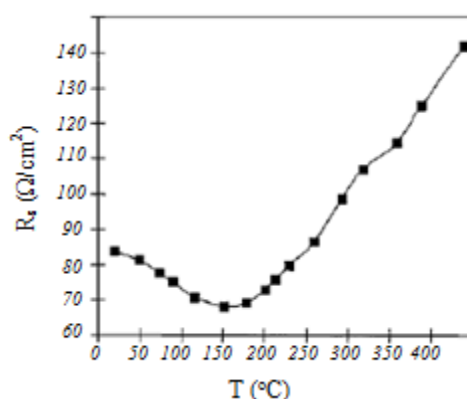


Figure 4. Temperature dependence of the surface electrical resistivity of tin dioxide (SnO_2) films.

Thus, the surface electrical resistivity of SnO_2 films is temperature-dependent and is governed by two competing processes:

In the range of 20–150 °C, the electrical conductivity is primarily determined by the ionization of donor states.

At temperatures above 150 °C, the dominant process is the desorption of oxygen, i.e., the adsorption of oxygen ions onto the film surface.

Within this temperature range, the distribution of charge carriers is largely influenced by the thermal vibrations of the crystal lattice.

III. Gas Sensitivity of SnO_2 Films

Currently, tin dioxide (SnO_2) is widely used in gas-sensitive semiconductor sensors. The operating principle of these sensors is based on changes in the physical parameters of the semiconductor material upon interaction with gas molecules. The physical parameters affected by gas adsorption on the semiconductor surface include electrical conductivity, work function, mobility of free charge carriers, surface charge carrier concentration, carrier lifetime, optical reflectance, and absorption coefficients. These parameters can be converted into the sensor's output signal, although not all are widely employed in practical applications.

For metal oxide semiconductors, particularly SnO_2 , the most informative parameter is the electrical conductivity (or resistivity), because even small changes in gas concentration lead to significant variations in electrical resistivity (Figure 5).

Within the operating temperature range of 200–500 °C, the oxygen vacancies in SnO_2 films act as chemisorption centers for atmospheric oxygen. Adsorbed oxygen captures electrons from the donor levels, resulting in the formation of a Schottky potential barrier at the film surface. Meanwhile, the subsurface region of the film is enriched with a positively charged space-charge layer.

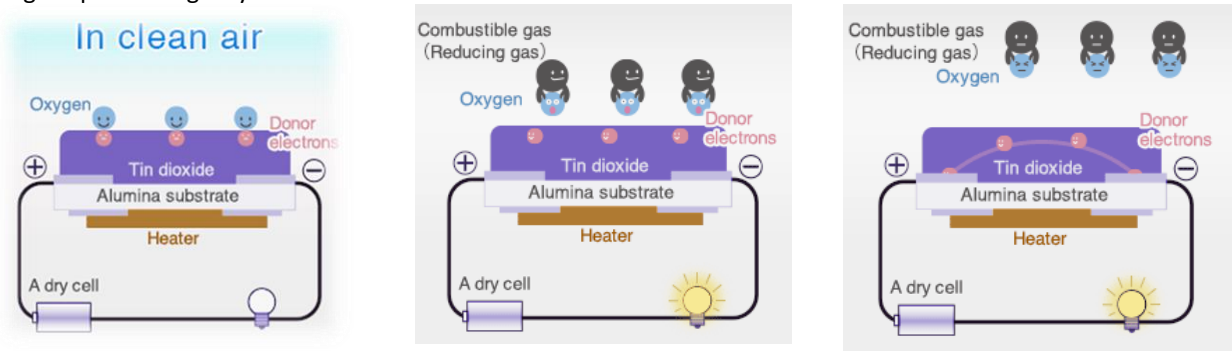


Figure 5. Operating mechanism of the SnO_2 gas sensor.

The electrical properties of tin dioxide (SnO_2) are influenced by chemisorption — that is, the chemical interaction of molecules with the material's surface — through two key parameters: the effective thickness of the surface layer and the height of the Schottky barrier. Depending on the structure of intergranular contacts in SnO_2 , three types of electrical conduction mechanisms can be distinguished: bulk conduction, surface “barrier” conduction, and charge transport through Schottky barriers.

When analyzing the conduction mechanisms in polycrystalline SnO_2 films, several factors must be considered. Studies show that the gas sensitivity of metal oxide semiconductors strongly depends on the grain size and microstructure of the film. In polycrystalline films, a depleted surface layer devoid of electrons is formed, whose depth is determined by the Debye screening length (L_D) and the magnitude of the surface potential [9].

$$L_D = \left(\frac{\epsilon_0 \epsilon kT}{nq^2} \right)^{1/2}$$

The Debye length (L_D) is temperature-dependent. The thickness of the space-charge layer is typically related to the Debye length by the following ratio:

$$L = L_D \left(\frac{2eV_s}{kT} \right)^{1/2}$$

Here, V_s is the surface potential, and kT is the thermal energy. The approximation $L \approx 2L_D$ is valid only when $eV_s \ll kT$.

The polycrystalline metal oxide semiconductor film consists of grains of size D , which contact each other through grain boundaries, narrow channels, or primarily through narrow channels with partial boundary contact. Depending on the ratio between the grain size (D) and the thickness of the space-charge layer ($L \approx 2L_D$), three types of electrical conduction models and gas-sensing mechanisms can be distinguished:

1. Grain-boundary model ($D \gg 2L_D$): Characteristic of thick films with a high concentration of charge carriers. The film resistivity is primarily determined by the resistance at the grain-boundary contacts.
2. "Barrier" model ($D \geq 2L_D$): Characteristic of intermediate-thickness films. Conductivity occurs mainly through intergranular channels and partially via grain boundaries. The film resistivity is largely defined by the resistance of the channels.
3. Ultra-fine grain model ($D < 2L_D$): Characteristic of thin films. Electrical conduction occurs throughout the entire grains, and the film resistivity depends on the grain size.

The gas sensitivity of the films is defined as the ratio of the film resistance in air (R_v) to the resistance measured in a test gas at a known concentration (R_g):

$$S_g = \frac{R_v}{R_g}$$

Gas sensitivity is often expressed in terms of changes in electrical conductivity:

$$S'_g = \frac{G_g + G_v}{G_v} = \frac{G_g}{G_v} + 1$$

here

$$G_g = \frac{1}{R_g}$$

— The film's conductivity in the presence of the test gas,

$$G_v = \frac{1}{R_v}$$

— The film's conductivity in air.

Thus: $S'_g = \frac{R_v}{R_g} + 1 = S_g + 1$ [10]

The dependence of the gas sensitivity S'_g on the gas concentration represents the static gas-sensing characteristic of the SnO_2 film. The change of S_g over the contact time of the film with the gas environment defines its dynamic characteristic.

SnO_2 -based gas sensors exhibit high sensitivity to hydrogen (H_2) in air, with a detection range of 0.001–2 vol.%. They can also detect hydrogen in a helium environment, with a range of 0.0001–2 vol.%.

Tin dioxide sensors are also capable of detecting the following gases:

- Hydrogen sulfide (H_2S): 0–300 mg/m³
- Freons: 0–10,000 mm/m³
- Ethanol vapors: 0–200 mg/m³
- Chlorine vapors: 0–200 mg/m³ [11]

Additionally, SnO_2 -based sensors can be used for detecting carbon monoxide (CO). The measurable concentration range of CO is 500–3000 ppm.

The dynamic characteristics of gas sensitivity of SnO_2 films (Figure 6) allow determining the response time of the system when the gas environment changes. For acetone–air, ethanol–air, and propanol–air mixtures, this response time is approximately 5–10 minutes. After removing the test gas mixture, the film's resistance in air recovers within 2–3 minutes. The data indicate that the sensitivity increases with gas concentration, with the highest sensitivity observed in Sample 3, reflecting the film structure's high adaptability to surface reactions.

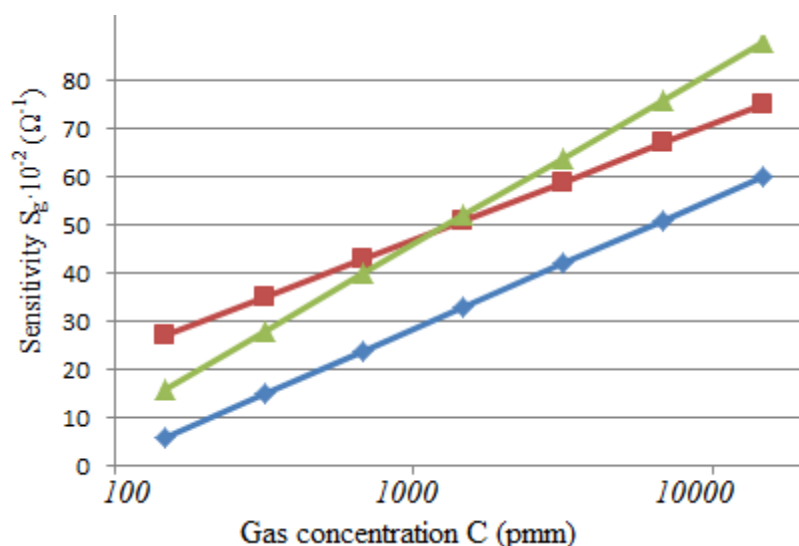


Figure 6. Dependence of the sensitivity of SnO₂ films on gas concentration.

IV. Conclusion. Thus, the study demonstrates that isothermal treatment increases on the SnO₂ sensing layer and releases oxygen-containing chemical bonds, resulting in enhanced stability of the gas sensors and improved electronic transport properties of the film. Furthermore, doping the SnO₂ sensing layer with Ag improves the samples' metrological characteristics—including sensitivity, selectivity, and power consumption—making them suitable for the selective detection of toxic and explosive gases.

References

1. Rahul Kumar, Mamta, Raman Kumari, Vidya Nand Singh. SnO₂-Based NO₂ Gas Sensor with Outstanding Sensing Performance at Room Temperature. *Micromachines*. 2023, 14(4), 728; <https://doi.org/10.3390/mi14040728>.
2. Pengfei Liu, Jianbin Wang, Han Jin, Meiying Ge, Fang Zhang, Cheng Wang, Yan Sun, Ning Dai. SnO₂ mesoporous nanoparticle-based gas sensor for highly sensitive and low concentration formaldehyde detection. *National Library of Medicine*. 2023 Jan 13; 13(4): 2256–2264. <https://doi.org/10.1039/d2ra06745e>
3. Shrestha Tyagi, Manika Chaudhary, Anit K. Ambedkar, Kavita Sharma, Yogendra K. Gautam, Beer Pal Singh. Metal oxide nanomaterial-based sensors for monitoring environmental NO₂ and its impact on the plant ecosystem: a review. *Royal Society of Chemistry*. 2022, 106–129. <https://doi.org/10.1039/d1sd00034a>
4. Arunkumar Shanmugasundaram, Karthikeyan Munirathinam, Dong-Weon Lee. SnO₂ nanostructure-based acetone sensors for breath analysis. *Micro and Nano Systems Letters* (2024) 12:3 <https://doi.org/10.1186/s40486-023-00196-5>.
5. Kovalenko, V. V. Surface chemistry of nanocrystalline SnO₂: effect of thermal treatment and additives / V. V. Kovalenko, A. A. Zhukova, M. N. Rumyantseva et. al. // *Sensors and Actuators*. – 2007. – V. 126.
6. Popova, L. I. Structure and morphology of thin SnO₂ films / L. I. Popova, M. G. Michailov, V. K. Georguiev // *Thin Solid Films*. – 1990. – V. 186.
7. Onyiat, A. I. Fabrication and characterisation of tin oxide SnO₂ thin films using simple glass spray systems / A. I. Onyiat, C. B. Okeket // *Journal of Applied Physics*. – 1989. – V. 22.
8. X.A. Махмудов, Ш.Х. Юлчиев, Ж.Н. Усмонов. Газочувствительные свойства пленок диоксида олова. *Scientific bulletin. Physical and Mathematical Research*. Vol. 4, Iss. 1. 2022.
9. Rembeza, S. I. Electrical resistivity and gas response mechanism of nanocrystalline SnO₂ films in a wide temperature range / S. I. Rembeza, E. S. Rembeza, T. V. Svistova et al. // *Physica Status Solidi (A)*. – 2000. – V. 179.
10. Barsan, N. Conduction model in gas-sensing SnO₂ layers: grain-size effects and ambient atmosphere influence / N. Barsan // *Sensor and Actuators*. – 1994. – V. B. – № 17.
11. Watson, J. The tin dioxide gas sensor / J. Watson, K. Ihokura, G. S. V. Colest // *Measurement Science and Technology*. 1993. № 4.

УДК 621.311

ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ІЗ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СПЛАВУ САМІТАЛ ДЛЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ НИЗЬКОПОТЕНЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ В ЕЛЕКТРИЧНУ

В. В. Козирський¹, В. Я. Бунько²

¹Компанія ALOTEK technology Sp.o.o., Польща,
тел.: +48 539 684 037, e-mail: kozyrskyivv@gmail.com

²Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут», вул. Академічна, 20, м. Бережани, 47501, Україна,
тел.: +380 97 451 97 01, e-mail: VBunko@gmail.com

У статті проведено аналіз використання елементів із функціонального сплаву Cu-Al-Mn (Camital), у вигляді пластин відповідних геометричних розмірів, які можуть бути використані в електроустановці з тепловим двигуном для генерації електроенергії. Особливістю теплового двигуна, у даному випадку, є застосування інноваційних засобів – сплаву з пам'яттю форми для перетворення теплової енергії в механічну роботу. 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 низькопотенційного джерела тепла.

Ключові слова: функціональний сплав, генерація електричної енергії, тепловий двигун, енергоефективна установка.

USE OF ELEMENTS MADE OF FUNCTIONAL CAMITAL ALLOY FOR CONVERTING THERMAL ENERGY FROM LOW-POWER SOURCES INTO ELECTRICITY

V. V. Kozyrskyi¹, V. Ia. Bunko²

¹ALOTEK technology Sp.o.o., Poland
phone: +48 539 684 037, e-mail: kozyrskyivv@gmail.com

²Separate subdivision of the National University of Bioresources and Nature Management of Ukraine "Berezhn Agrotechnical Institute", St. 20 Akademichna St., Berezhany, 47501, Ukraine,
phone: +380 97 451 97 01, e-mail: VBunko@gmail.com

The article analyses the use of elements made of a functional Cu-Al-Mn alloy (Camital) in the form of plates of appropriate geometric dimensions, which can be used in an electrical installation with a heat engine for generating electricity. A distinctive feature of the heat engine in this case is the use of innovative means – a shape memory alloy for converting thermal energy into mechanical work. In processing experimental studies, methods of theoretical analysis are used based on the patterns of influence of the electrothermal and thermomechanical properties of functional alloys with shape memory effect phenomena. Such elements can potentially be used in a heat engine to create an energy-efficient installation for generating electrical energy using a low-potential heat source.

Key words: functional alloy, electricity generation, heat engine, energy-efficient installation.

ORCID: ¹0000-0001-6780-9750; ²0000-0002-9403-8135.

Створення інноваційних елементів і механізмів на основі функціональних матеріалів із термopружними мартенситними перетвореннями, зокрема інтерметалічних сплавів на основі Cu-Al-Mn (Camital), є перспективним напрямом розвитку сучасної електротехнічної бази. Зазначений матеріал характеризується комплексом унікальних фізико-механічних і функціональних властивостей, що зумовлюють його належність до класу «інтелектуальних» матеріалів з ефектом пам'яті форми та надпружністю. Механізм оборотного фазового перетворення аустеніт–мартенсит забезпечує можливість керованої зміни напружено-деформованого стану елементів під дією температурних і силових чинників. Елементи, виготовлені зі сплаву системи Cu-Al-Mn (Camital), здатні розвивати значні реактивні напруження, що досягають сотень мегапаскалів, що зумовлює їхню високу енергетичну насиченість та придатність до

використання в силових і контактних вузлах електротехнічних установок. Завдяки наявності оборотних термopужних мартенситних перетворень такі елементи реалізують функцію прямого перетворення теплової енергії у механічну роботу, виступаючи водночас як чутливий термочутливий елемент (датчик температури) і виконавчий механізм у визначеному інтервалі температур.

Сплави з ефектом пам'яті форми здатні до взаємного перетворення теплової, механічної та електричної енергії, що дозволяє розглядати їх як функціональні матеріали мультифізичної дії. У межах заданого температурного діапазону вони виконують роль найпростішого «трансформатора» теплової енергії в механічну, забезпечуючи керовану генерацію зусиль і переміщень без застосування складних кінематичних систем [1-3].

Теоретико-експериментальні дослідження базуються на загальнонаукових методах аналізу та узагальнення закономірностей впливу фізичних чинників – зокрема електротеплових і термомеханічних процесів – на функціональні характеристики сплавів системи Cu-Al-Mn. Емпіричні залежності, отримані в результаті випробувань на спеціалізованих експериментальних стендах, слугують основою для побудови математичних моделей, що описують напружено-деформований стан, кінетику фазових перетворень та енергетичні параметри роботи елементів із пам'яттю форми в умовах експлуатаційних навантажень. На рис.1. зображено випробувальну установку для визначення реактивного зусилля пластини Camital при зміні температури теплового агенту.

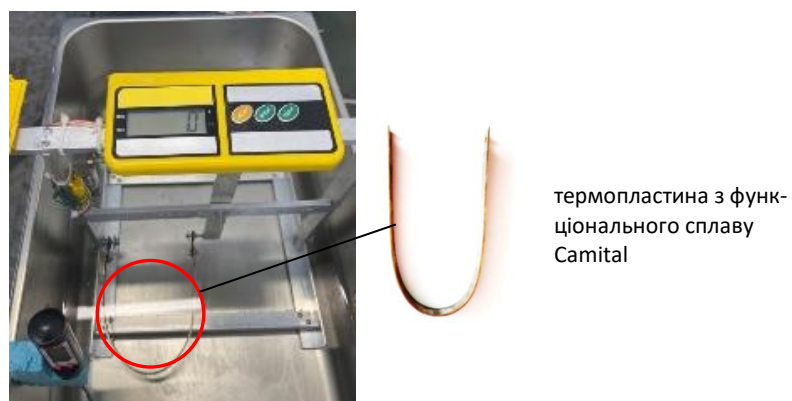


Рис.1 – Розміщення термопластини Camital у випробувальній установці

Конструктивною схемою запропонованого теплового двигуна (рис.2), який може працювати на низькопотенційній енергії вторинних джерел тепла, передбачено використання дев'яти термочутливих пластин зі сплаву з ефектом пам'яті форми, які в процесі нагрівання здійснюють зворотне формовідновлення – зміну кривизни від попередньої заданої параболічної конфігурації до прямолінійної – з переміщенням уздовж напрямних спиць. Така кінематична трансформація зумовлена реалізацією зворотного мартенситного перетворення та супроводжується розвитком реактивних зусиль [4].



Рис.2 – Загальний вигляд теплового двигуна з термочутливими елементами із сплаву з пам'яттю форми Camital

Оскільки вузол з'єднання напрямних спиць конструктивно зміщений відносно геометричної осі обертання робочого колеса на ексцентричну відстань, у процесі формовідновлення пластин створюються умови для виникнення результуючого обертового моменту. Таким чином, лінійне переміщення та силова дія термочутливих елементів трансформуються у крутний момент на валу двигуна. Величина сформованого обертового моменту визначається сукупністю конструктивно-параметричних і матеріалознавчих чинників, зокрема геометричними розмірами робочого колеса та ексцентриситетом, довжиною, товщиною і початковою кривиною пластин, а також їх термомеханічними характеристиками (температурними інтервалами фазових перетворень, рівнем генерованих напружень, модулем пружності в аустенітній і мартенситній фазах, гістерезисними параметрами тощо).

Отже, системний і комплексний облік визначених конструктивних, геометричних та термомеханічних параметрів є необхідною науково обґрунтованою передумовою оптимізації енергетичних характеристик і підвищення коефіцієнта корисної дії теплового двигуна. Такий підхід забезпечує раціональне узгодження процесів фазових перетворень, силової взаємодії та кінематичних параметрів, що в сукупності визначає ефективність функціонування двигуна як енергоперетворювального модуля для трансформації теплової енергії в механічну та подальшої її конверсії в електричну.

ПОСИЛАННЯ

1. Official website of the company ALOTEK technology, <https://alotek.international/uk/materials> (date of appeal 15.02.2026).
2. Kozyrskiy, V. V., Kaplun, V. V., & Voloshyn, S. M. (2021). Funktsionalni intermetally v elektroenerhetychnykh ustanovkakh [Functional intermetallics in power plants]. Kyiv: «Kompynt».
3. Liping Kang, Hui Qian, Yuancheng Guo, Chenyang Ye, & Zongao Li. (2020). Investigation of Mechanical Properties of Large Shape Memory Alloy Bars under Different Heat Treatments. *Materials*, 13(17), 3729; <https://doi.org/10.3390/ma13173729>
4. Kozyrskiy V., Bunko V. Experimental Studies of Elements from the Functional Intermetallic Cu-Al-Mn for Construction of a Heat Engine and Power Plant. *Problems of the Regional Energetics*. 2025. pp.162-173. <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.3-67.14>

УДК 697.912:620.9:636

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ АКТИВНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ ДЛЯ МІНІМІЗАЦІЇ ТЕПЛООВОГО СТРЕСУ В ТВАРИННИЦТВІ

Ю. І. Дзюбан

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (050) 377-37-16, e-mail: 1809yra@gmail.com

Постановка задачі та актуальність. Глобальні кліматичні зміни призводять до регулярних періодів екстремальної спеки, що створює критичні ризики для агросектору, зокрема для молочного тваринництва. Велика рогата худоба (ВРХ) вкрай чутлива до високих температур. На прикладі господарства у Полтавській області зафіксовано, що в літній період добові надої падають з 30 до 25 літрів на одну голову. Для комплексу на 194 особи сумарні втрати молока за сезон (червень-серпень) складають близько 87 300 літрів. Актуальність роботи полягає у необхідності впровадження систем активного охолодження для стабілізації продуктивності тварин в умовах температурних піків

Ключові слова: енергоефективність, тепловий стрес ВРХ, активне охолодження, термін окупності.

SUBSTANTIATION OF THE ENERGY EFFICIENCY OF ACTIVE COOLING SYSTEMS TO MINIMIZE HEAT STRESS IN LIVESTOCK

Y. Dziuban

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone: (050) 377-37-16, e-mail: 1809yra@gmail.com

Problem statement and relevance. Global climate changes lead to regular periods of extreme heat, creating critical risks for the agricultural sector, particularly for dairy farming. Cattle are extremely sensitive to high temperatures. Taking a farm in the Poltava region as an example, it was recorded that in the summer period, daily milk yields fall from 30 to 25 liters per head. For a complex of 194 individuals, the total loss of milk per season (June–August) is approximately 87,300 liters. The relevance of this work lies in the need to implement active cooling systems to stabilize productivity during peak temperature periods.

Keywords: energy efficiency, heat stress of cattle, active cooling, payback period.

ORCID: 0009-0006-4585-7835.

Наукова новизна та технічне рішення. Наукова новизна полягає в обґрунтуванні переваг систем активного охолодження над традиційними методами пасивного провітрювання тваринницьких комплексів. На відміну від поширеної практики охолодження шляхом відкривання воріт, що часто призводить до виникнення протягів та, як наслідок, запалення вим'я (мастити) у корів, запропоноване рішення забезпечує контрольований мікроклімат. Технічне рішення базується на використанні припливних вентиляційних установок з інтегрованими блоками охолодження. Авторський підхід передбачає автоматизацію процесу за показниками внутрішніх термостатів, що дозволяє стабілізувати температуру на рівні 24–26°C без створення небезпечних для здоров'я тварин повітряних потоків та з мінімальними енерговитратами

Результати та економічна ефективність. Для розрахунку використано технічні параметри системи загальною холодопродуктивністю 56 кВт при сумарній електричній потужності 18,8 кВт. Моделювання режимів роботи показало наступне:

- Прямі збитки господарства від недоотриманого молока без системи охолодження складають 14 550 грн./добу (при ціні 15 грн./кг).

- Витрати на електроенергію для роботи системи активного охолодження складають лише 1 363 грн./добу (при тарифі 7,25 грн./кВт·год).
- Експлуатаційні витрати на підтримку мікроклімату в 10,6 раза менші за потенційні фінансові збитки

Висновки. Впровадження систем активного охолодження з автоматизованим керуванням дозволяє практично повністю нівелювати вплив теплового стресу на ВРХ. Отриманий економічний ефект у розмірі понад 13 000 грн. чистого прибутку на добу протягом літнього періоду підтверджує високу енергоефективність запропонованого технічного рішення та забезпечує короткий термін окупності капітальних інвестицій.

ПОСИЛАННЯ

1. Технічна документація «Aerostar». Припливні установки GreenSTR та ККБ Basicfreeze.
2. Sklyarenko Y. I., Fedorchenko M. M. Influence of microclimate parameters on milk productivity of cows. Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. 2019. Vol. 21. No. 90. P. 119–124.

СВИНЦЕВО-ВУГЛЕЦЕВІ АКУМУЛЯТОРНІ БАТАРЕЇ

В. Ю. Скосар¹, С. В. Комаров², Н. В. Бурилова³, С. В. Бурилов⁴

*Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України,
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (066) 731-86-18, e-mail: skosarslava@gmail.com*

Проведено аналіз науково-технічних публікацій щодо досліджень і розробок у галузі так званих «вуглецевих» акумуляторів. Насправді мова йде про свинцево-кислотні акумуляторні батареї, в яких у свинцевий електрод додають 1-2 % вуглецю різних форм. Встановлено, що така добавка суттєво збільшує довговічність у випадку застосування таких батарей у гібридних автомобілях, електромобілях та системах відновлюваної енергетики. Зроблені експериментальні зразки свинцево-вуглецевих батарей з 1,0 % графіту у свинцевому електроді. Проведено тести на довговічність в умовах багаторазових циклів неглибоких потужних розрядів і швидких зарядок. Нові Pb-C батареї витримали 1000 циклів, тоді як контрольні свинцево-кислотні батареї (без графіту) вийшли з ладу після 600 циклу.

Ключові слова: свинцево-кислотні акумулятори, добавка вуглецю в свинцевий електрод, гібридні автомобілі, електромобілі, відновлювана енергетика.

LEAD-CARBON BATTERIES

V. Yu. Skosar¹, S. V. Komarov², N. V. Burylova³, S. V. Burylov⁴

*¹Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5 Pisarzhevskiy str., Dnipro, 49005, Ukraine,
phone: (066) 731-86-18, e-mail: skosarslava@gmail.com*

An analysis of scientific and technical publications on research and development in the field of so-called "carbon" batteries was conducted. In fact, we are talking about lead-acid batteries in which 1-2% of carbon in various forms is added to the lead electrode. It has been established that such an additive significantly increases the durability of such batteries in hybrid vehicles, electric vehicles and renewable energy systems. Experimental samples of lead-carbon batteries with 1.0% graphite in the lead electrode have been made. Durability tests were conducted under conditions of multiple cycles of shallow high-power discharges and fast charges. The new Pb-C batteries withstood 1000 cycles, while the control lead-acid batteries (without graphite) failed after 600 cycles.

Key words: lead-acid batteries, carbon addition to the lead electrode, hybrid cars, electric cars, renewable energy.

ORCID: ¹0000-0002-2151-3417, ²0000-0002-6065-9478; ³0000-0003-0474-0236; ⁴0000-0001-8070-6764.

Свинцево-кислотні батареї багаторазово вдосконалювалися, що дозволило їм тривалий час утримувати за собою значну частину ринку, незважаючи на конкуренцію з боку інших електрохімічних акумуляторів, наприклад, літій-іонних [1-3]. Нещодавно на ринку з'явилися так звані «вуглецеві» акумуляторні батареї. Мова йде про свинцево-вуглецеві акумулятори (Pb-C). Нові свинцево-вуглецеві батареї можна розглядати як чергове вдале вдосконалення, яке вдихнуло «друге дихання» у стару свинцево-кислотну модель. Pb-C батареї відрізняються від традиційних свинцево-кислотних батарей додатковою добавкою вуглецю у негативні свинцеві електроди. Якщо у звичайних свинцевих електродах застосовують добавку вугільної сажі в кількості 0,1-0,2 % для допоміжних цілей, то у свинцево-вуглецевих електродах застосовують добавки різних форм вуглецю в активну масу в кількостях 1-2 %. В деяких варіантах Pb-C батарей додавання вуглецю здійснюють більш складним способом, наприклад на поверхню електроду, або на струмовідвід [4-8].

Корисною властивістю Pb-C батарей є здатність довгий час витримувати багаторазові цикли розряду-заряду, причому мова йде про потужні короткі розряди та швидкі зарядки. Це з'явилося цінною якістю у випадку застосування

таких батарей у гібридних автомобілях, електромобілях та системах відновлюваної енергетики. Оскільки виробники Pb-C батарей тримають у таємниці свої технології, актуальним питанням є розробка власної технології виробництва нових акумуляторних батарей.

Як основу ми використовували свинцево-кислотні батареї 12 В, 45 А·год виробництва МНПК «ВЕСТА», в якік відірали усі пари електродних пластин в кожному акумуляторі, за винятком однієї пари пластин: позитивного і негативного електрода. В негативні свинцеві електродні пластини ми додали в свинцеву пасту 1,0 % порошку графіту марки ГП (особливо чистий). Це було зроблено на етапі замісу пасту. В кожному осередку (акумуляторі) ми заповнили вільний об'єм пласниками з поліпропілену. Це створило умови для умов, аналогічних акумуляторної батареї 12 В, близько 11 А·год. Електролітом був водний розчин сірчаної кислоти, густиною 1,28 г/см³. Було виготовлено три таких Pb-C батарей, а також три контрольних батарей без додавання графіту. Перший заряд (формування) усіх батарей провели за стандартною програмою формування, але струмом, який був зменшено у 4 рази від стандартного струму на кожному етапі програми.

Усі батареї піддали циклам потужних неглибоких розрядів і швидких зарядок. Струм розряду довінював 80 А, струм зарядки дорівнював 40 А. Після кожних 200 циклів розряд-заряд контролювали ємність 20-годинного розряду. Результати тестів приведено на рис. 1, де білі кружки означають Pb-C батареї, а чорні кружки означають контрольні свинцево-кислотні батареї без додавання графіту.

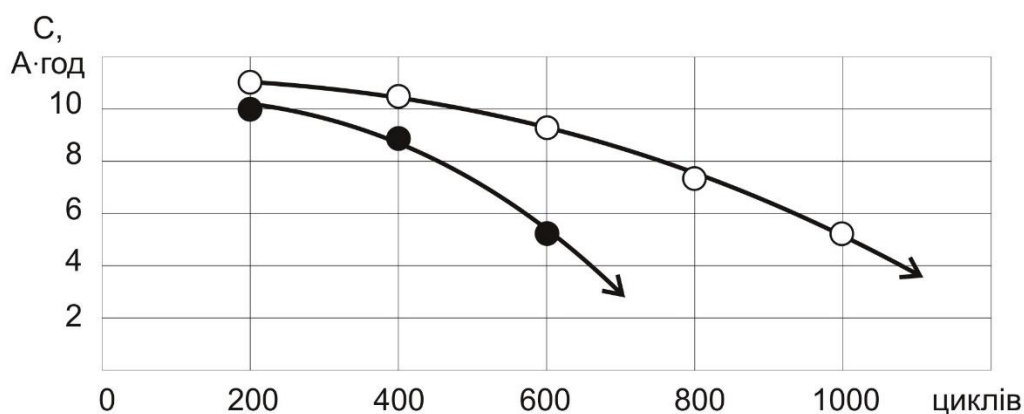


Рис. 1. Залежність ємності від номера циклу розряд-заряд

Контрольні (стандартні) свинцево-кислотні батареї вийшли з ладу після 600 циклу. Нові Pb-C батареї витримали 1000 циклів. Таким чином, вдалося підтвердити позитивний ефект додавання 1,0 % графіту у свинцевий електрод для специфічних умов експлуатації акумуляторних батарей. Попередні результати свідчать на користь перспектив відповідної технології.

Крім того, після кожних 200 циклів розряд-заряд контролювали зарядну напругу і розрядну напругу, які перераховано на один акумулятор. Результати приведено у табл. 1. З таблиці видно, що нові Pb-C акумулятори мають нижче зарядну напругу і вище розрядну напругу. Це демонструє перевагу над стандартними акумуляторами, оскільки підвищена зарядна напруга означає підвищені втрати електроенергії під час заряджання. А знижена розрядна напруга означає меншу енергоефективність.

Аналогічні результати було отримано у випадку додавання у свинцевий електрод на етапі замісу пасту 1,5 % такого ж порошку графіту марки ГП.

Літературні джерела свідчать, що збільшення вуглецю у свинцевому електроді може призвести до підвищення генерації водню під час зарядки. Тому для попередження цього негативного явища, перевищення вмісту синтетичного графіту марки MAG більш 1,5 % недоцільно.

Для підтвердження отриманих результатів автори планують проводити іспити нових Pb-C батарей на гібридних автомобілях та електромобілях. Крім того, автори планують проводити іспити нових батарей у складі систем відновлюваної енергетики. Мова йде про автономні системи електроживлення за участю сонячних фотоелектричних панелів, вітроенергетичних установок і теплових насосів.

Таблиця 1. Залежність зарядної напруги та розрядної напруги від номера циклу розряд-заряд

Номер циклу	Зарядна напруга нових акумуляторів	Зарядна напруга стандартних акумуляторів	Розрядна напруга нових акумуляторів	Розрядна напруга стандартних акумуляторів
200	2,21 В	2,39 В	1,96 В	1,91 В
400	2,25 В	2,31 В	1,94 В	1,88 В
600	2,24 В	2,37 В	1,90 В	1,72 В
800	2,22 В	-	1,84 В	-
1000	2,23 В	-	1,79 В	-

Висновки:

1. Аналіз науково-технічних публікацій в галузі свинцево-кислотних і свинцево-вуглецевих акумуляторів свідчить, що останні мають здатність довгий час витримувати багаторазові цикли розряду-заряду (потужні короткі розряди та швидкі зарядки). Це дозволяє Pb-C батареям краще працювати у гібридних автомобілях, електромобілях та системах відновлюваної енергетики. Але в Україні відсутня вітчизняна технологія Pb-C батарей.
2. Авторами виготовлено експериментальні зразки Pb-C батарей, які успішно пройшли тести на довговічність в умовах, які моделюють роботу у нових транспортних та енергетичних системах. Це зміцнює надію на створення власної технології Pb-C батарей. Але необхідні подальші експериментальні дослідження.

ПОСИЛАННЯ

10. Скосар, В., Бурилов, С., & Дзензерський, В. (2025). Перспективи застосування електромагнітного транспорту. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (3), 48–60. <https://doi.org/10.15407/dopovid2025.03.048>.
11. Yeliseyev, V. I., Skosar, V. Y., & Katrenko, M. O. (2025). Numerical analysis of the effect of the design and manufacturing parameters of starter lead-acid batteries on their discharge characteristic. Technical Mechanics, (4), 93–101. <https://doi.org/10.15407/itm2025.04.093>.
12. Back to basics. URL: <https://clubassist.com.au/Expert-Advice/News/Lead-acid-batteries> (дата звернення: 02.03.2026).
13. Performance-enhancing materials for lead-acid battery negative plates. K. Peters, D.A.J. Rand, P.T. Moseley. Lead-Acid Batteries for Future Automobiles. 2017. P. 213-234. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-444-63700-0.00007-6>.
14. Effect of graphene oxide with different oxygenated groups on the high-rate partial-state-of-charge performance of lead-acid batteries. Weijia Caia, Kai Qi, Zhenyu Chen, Xingpeng Guo, Yubing Qiu. Journal of Energy Storage. 2018. Volume 18, Pages 414-420. <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.06.004>.
15. Effect of carbon nanotubes with varying dimensions and properties on the performance of lead acid batteries operating under high rate partial state of charge conditions. S. Mithin Kumar, S. Arun, Sundar Mayavan. Journal of Energy Storage 24 (2019) 100806. <https://doi.org/10.1016/j.est.2019.100806>.
16. Design principles of lead-carbon additives toward better lead-carbon batteries. Wenli Zhang, Jian Yin, Haibo Lin, Ke Lu, Fan Feng, Xueqing Qiu. Current Opinion in Electrochemistry. 2021. Volume 30, 100802. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2021.100802>.
17. Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes: A review. Kaushik Yanamandra, Dinesh Pinisetty, Nikhil Gupta. Renewable and Sustainable Energy Reviews 173 (2023) 113078. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.113078>.

ЗАЛІЗНИЧНИЙ МАГНІТОЛЕВІТАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

В. Ю. Скосар¹, Ю. В. Шкіль²

*Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України,
вул. Писаржевського, 5, м.Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (066) 731-86-18, e-mail: skosarslava@gmail.com*

У світі проводяться дослідження і розробки у галузі магнітолевітаційного транспорту, який здатний рухатися звичайними залізничними коліями, що суттєво здешевлює усю транспорту інфраструктуру транспорту на магнітному підвісі. Нами досліджено принципіальні елементи такого транспорту: магнітний підвіс працює на основі потужних постійних магнітів; розгон, тягу і гальмування забезпечує лінійний синхронний двигун із уніполярним збудженням; керування здійснюється системою управління з підсистемою навігації. Нова транспортна система може використовуватися у якості міського і приміського електротранспорту.

Ключові слова: *магнітолевітаційний транспорт, міський і приміський електротранспорт, залізничні рейки, пасивна магнітна левітація, постійні супермагніти, лінійний синхронний двигун, система керування, підсистема навігації.*

MAGNETOLEVITATION RAIL TRANSPORT

V. Yu. Skosar¹, Yu. V. Shkil²

*²Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5 Pisarzhevskiy str., Dnipro, 49005, Ukraine,
phone: (066) 731-86-18, e-mail: skosarslava@gmail.com*

Research and development is being conducted worldwide in the field of magnetic levitation transport, which is capable of moving on conventional railway tracks, which significantly reduces the cost of the entire transport infrastructure of magnetic levitation transport. We have investigated the fundamental elements of such transport: magnetic suspension operates on the basis of powerful permanent magnets; acceleration, traction and braking are provided by a linear synchronous motor with unipolar excitation; the control is carried out by a control system with a navigation subsystem. The new transport system can be used as urban and suburban electric transport.

Key words: *magnetic levitation transport, urban and suburban electric transport, railway rails, passive magnetic levitation, permanent supermagnets, linear synchronous motor, control system, navigation subsystem.*

ORCID: ¹0000-0002-2151-3417, ²0000-0002-8684-5906.

Магнітолевітаційний транспорт є енергозберігаючим, екологічно чистим видом транспорту. Такий транспорт здатний функціонувати як на високих швидкостях (~ 600 км/год), так і на відносно низьких (~ 200 км/год) в якості міського електротранспорту [1-3].

Нами здійснено дослідження з розробки магнітолевітаційного транспорту, який працює за принципом «пасивної» магнітної левітації, і здатний до руху звичайними залізничними рейками [4-8]. Закордонні розробники такого транспортного засобу зберігають у секреті основні елементи нової транспортної технології. Але перспективність вказаних розробок обумовлює актуальність цієї теми.

Новий транспорт може бути кращим у міських умовах, де є рейкова інфраструктура, а також як приміський електротранспорт.

Магнітний підвіс нашого транспортного засобу працює на основі потужних постійних магнітів, наприклад, NdFeB. Схема магнітного підвісу відповідає нашим попереднім розробкам [9].

В якості тягового двигуна запропоновано використовувати лінійний синхронний двигун із уніполярним збудженням, схема якого наведена на рис. 1.

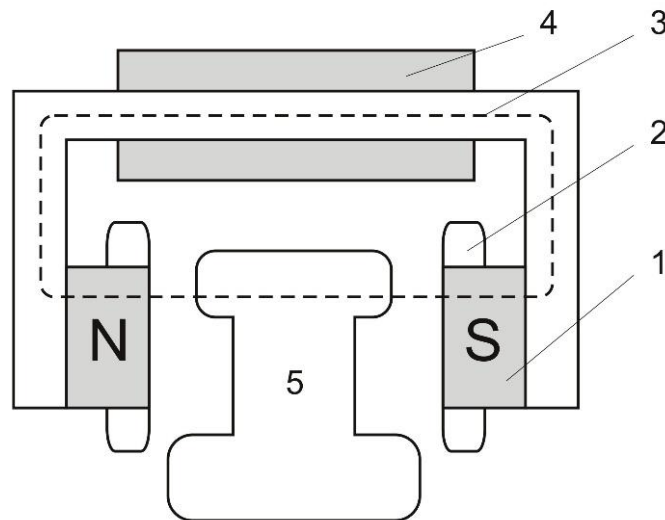


Рис.1. Схема лінійного синхронного двигуна

Два статора 1 (N та S) встановлено на рухомій частині транспортного засобу (на рис. 1 не вказано). За допомогою обмоток 2 електромагніта створюється магнітне поле, що біжить. Статори 1 з'єднані магнітопроводом 3, на якому розташована обмотка 4 електромагніта уніполярного збудження. Обмотка 4 створює постійний за напрямком магнітний потік, якій зображено пунктирною лінією. Цей магнітний потік пронизує феромагнітну рейку 5. В даному варіанті взаємодія магнітного поля, що біжить, з намагніченою рейкою створює силу тяги транспортного засобу.

Спосіб навігації та управління рухом магнітолевітаційного транспорту реалізується згідно принципам, розробленим в [10, 11].

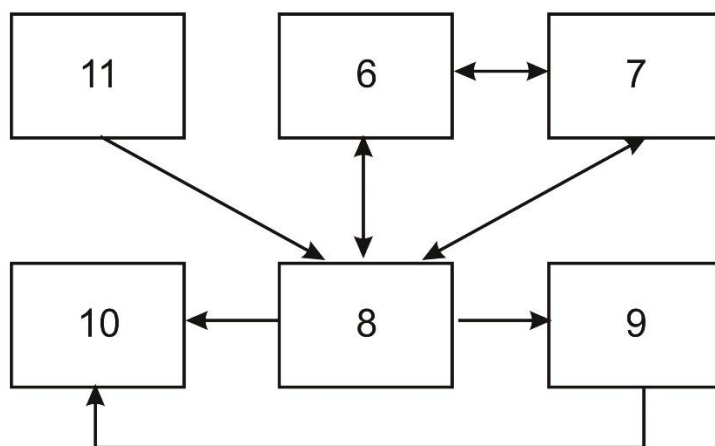


Рис. 2. Схема керування транспортним засобом

В основі системи управління магнітолевітаційним транспортом лежать такі функціональні підсистеми. Підсистема екіпажу 6 у тісному контакті з підсистемою центрального диспетницького пункту 7 взаємодіють із підсистемою управління рухом 8. Також на підсистему 8 впливає підсистема навігації 11, яка надає інформацію щодо розташування транспортного засобу. Підсистема управління рухом 8 впливає на підсистему електроживлення 9 і підсистему лінійного двигуна 10. Остання отримує вплив від підсистеми електроживлення 9.

Таким чином, керування розгоном, рухом і гальмуванням реалізується за рахунок інформаційного взаємозв'язку між основними підсистемами транспортного засобу.

Для навігації може бути використаний метод безперервного позиціонування магнітолевітаційного транспортного засобу за декількома ступенями свободи на основі фазового далекоміра для довільної конфігурації в тривимірному просторі нерухомого рейкового шляху.

Наше дослідження є міждисциплінарним і здійснено співробітниками відділу «Електротехнічних комплексів та хімічних джерел струму транспортного призначення» та співробітниками відділу «Систем управління перспективними транспортними комплексами».

Висновки:

1. У світі проводять дослідження з розробки магнітолевітаційного транспорту, який працює за принципом «пасивної» магнітної левітації, і здатний до руху звичайними залізничними рейками. Він може бути перспективним у міських умовах, де є рейкова інфраструктура, а також як приміський електротранспорт.
2. Наша розробка включає магнітний підвіс на основі постійних супермагнітів, лінійний синхронний двигун із уніполярним збудженням, систему керування з підсистемою навігації.
3. Отримані результати зміцнюють надію на створення нової власної транспортної технології. Але необхідні подальші теоретичні та експериментальні дослідження.

ПОСИЛАННЯ

1. Скосар, В., Бурилов, С., & Дзензерський, В. (2025). Перспективи застосування електромагнітного транспорту. Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine, (3), 48–60. <https://doi.org/10.15407/dopovid2025.03.048>.
2. Skosar, V. Yu., Burylov, S. V., Dzenzerskyi, V. O. (2023). Some problems of ultra-high-speed transportation technologies. Science and Transport Progress, No. 2 (102), pp. 5-16. (in Ukrainian). <https://doi.org/10.15802/stp2023/288073>.
3. Геєць В.М., Волошин О.І., Дзензерський В.О., Никифорок О.І. Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління. Київ: Інститут транспортних систем і технологій НАН України, 2020. 254 с.
4. Magnetic Levitation Made Simple And Affordable: A Revolutionary View On The Future Of Transportation. URL: <https://www.ironlev.com/transport> (дата звернення: 02.03.2026).
5. Ironlev Official. URL: <https://www.youtube.com/@ironlevofficial2780> (дата звернення: 02.03.2026).
6. MagRail - a new, innovative technology by Nevomo. URL: https://youtu.be/fYvIAIWM_HY?si=x8tEveILQUO3cuVf (дата звернення: 02.03.2026).
7. World's first levitating train on existing infrastructure! MagRail by Nevomo. URL: https://youtu.be/CQOEP7_euXQ?si=HSoKfdJUS5fIRc55 (дата звернення: 02.03.2026).
8. Nevomo – Into the future of rail. URL: <https://nevomo.com/#:~:text=Nevomo%20is%20a%20company%20that%20develops%20technology,emissions%2C%20halved%20travel%20times%2C%20and%20doubled%20capacity> (дата звернення: 02.03.2026).
9. Швидкісний електротранспорт на магнітній подушці. В. Ю. Скосар, Ю. В. Шкіль. Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» 21–23 травня 2025 року. Київ. <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025>.
10. Holota, O., Plaksin, S., & Shkil, Y. (2022). Determination of the coordinates of the spatial orientation of the magnetoplan regarding the rail structure. Transport Systems and Technologies, (40), 159–169. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-14>.
11. Mukha, A. M., Plaksin, S., Pohorila, L. M., Ustymenko, D. V., & Shkil, Y. (2022). Combined System of Synchronized Simultaneous Control of Magnetic Plane Movement and Suspension. Science and Transport Progress, (1(97), 23–31. <https://doi.org/10.15802/stp2022/265332>.

ЗАХОДИ ІЗ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШИЛЬНИХ УСТАНОВОК ІЗ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

В. М. Пазюк¹, В. М. Вішнівський², С. О. Бірюков³, О. В. Пазюк⁴

^{1,2,3} Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. М.Капніст, 2а, м. Київ, 03680, Україна,
тел.: (096) 223-53-06, e-mail: vadim_pazuk@ukr.net

⁴ Національний університет харчових технологій.

Представлені напрямки із підвищення енергоефективності сушильних установок із тепловим насосом – світовий досвід та власні заходи направлені на модернізацію існуючої сушильної установки із тепловим насосом.

Ключові слова: енергоефективність, сушильна установка, тепловий насос, товстоплівкові електричні нагрівачі.

ORCID: ¹0000-0002-4955-1941; ²0000-0002-2424-8102; ³0009-0005-4382-6587, ⁴0009-0008-3525-5691

MEASURES TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY OF HEAT PUMP DRYERS

V. M. Paziuk¹, V. M. Vyshnievskyi², S. O. Biriukov³, O. V. Paziuk

^{1,2,3} Institute of Technical Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
2a M. Kapnist St., Kyiv, 03680, Ukraine,
tel.: (096) 223-53-06, e-mail: vadim_pazuk@ukr.net

⁴ National University of Food Technologies.

Directions for increasing the energy efficiency of heat pump drying units are presented - world experience and our own measures aimed at modernizing an existing heat pump drying unit

Keywords: energy efficiency, drying plant, heat pump, thick-film electric heaters

ORCID: ¹0000-0002-4955-1941; ²0000-0002-2424-8102; ³0009-0005-4382-6587, ⁴0009-0008-3525-5691

Проводячи аналіз діючих сушильних установок встановлено декілька етапів розвитку сушильних технологій, що представлено нами як еволюція технологій та обладнання із підвищення інтенсивності та енергоефективності сушіння (рис. 1)



Рис. 1. Розвиток сушильних установок та енергоефективні технології із тепловим насосом

Рухаючись знизу вгору по схемі спостерігаємо розвиток сушильних установок для сушіння зерна направлених на зниження енергетичних витрат на процес сушіння.

На першому етапі представлена технологія природного сушіння, що передбачає наявність сонячної погоди при температурах середовища вище 20°C . Але це довгий процес сушіння, коливань температур та вологості днем та вночі, можливі опади не дозволяють ефективно проводити процес сушіння, хоча з боку енергоефективності витрати теплоти не перевищують 3000 кДж/кг вип. вологи. Сушильні установки, такі як бункери та силоси для вентилявання злегка підігрітим повітрям на $2 - 3^{\circ}\text{C}$ дозволяють знизити вологість зерна, але тривалість сушіння залежить від параметрів навколишнього середовища, тривалість сушіння може тривати декілька діб, що знижує ефективність виробництва.

На другому етапі представлені технології з високою температурою сушіння, що широко використовувались в шахтних та колонкових зерносушарках різних типів, основне завдання – це прискорити процес сушіння зерна за рахунок збільшення температури теплоносія до $100 - 120^{\circ}\text{C}$ та зниження питомих витрат теплоти, що пов'язано із збільшенням продуктивності сушарок до 100 і більше тонн за годину при відповідній зниженні вологості зерна за один прохід крізь сушарку від 4 до 6% , а іноді і 8% . Розроблялись заходи із підвищення енергоефективності сушіння зерна за рахунок попереднього еоротеочасного підігрівання зерна, відлежування, рециркуляції теплоносія та рециркуляції зерна із додаванням вологого зерна та інші схеми. Також вдосконалювались топкові пристрої проводився перехід від теплогенераторів на біомасі та рідкому паливі на газові, як економічно-доцільні (зараз спостерігається зворотний процес). Енергетичні витрати при сушіння становлять в середньому близько $4350 - 4840 \text{ кДж/кг}$ вип. вологи, тривалість сушіння займає години, процес сушіння безперервний.

На третьому етапі представлені технології з тепловим насосом пов'язані з тим, що він здатний виробляти на 1 кВт електричної енергії $3 - 4 \text{ кВт}$ теплової енергії. В сушильних установках витрати на теплову енергію в порівнянні з електричною можуть складати до $80 - 90\%$, тому це є достатньо економічною складовою процесу. Технології з тепловим насосом встановлюють в основному в приміщеннях та промислових цехах із стабільним постачанням електричної енергії та параметрами навколишнього середовища. Проведені нами дослідження із енергоефективності на камерній сушарці показали витрати теплоти на рівні 4480 кДж/кг вип. вологи при температурі теплоносія 50°C , що позитивно впливає на якість матеріалу [1].

На четвертому етапі для кращої і стабільної роботи теплового насосу використовують гібридні технології, які не набули широкого розповсюдження, але проводяться дослідження в цьому напрямку на експериментальних установках. Наприклад, до них можна віднести, сушарки з тепловим насосом + з силою Кулона, радіочастотна сушарка + з тепловим насосом та сушарка з тепловим насосом + з ультразвуковом. Зниження енергоефективності сушіння направлена на збільшення інтенсивності сушіння при нагріванні матеріалу за рахунок іншого методу будь-то ультразвуку, радіочастотного, інфрачервоного, мікрохвильового та іншого способу, а потім сушіння за рахунок теплового насосу. Якщо оцінювати енергетичні ефективність даного способу сушіння за коефіцієнтом корисної дії, то він становить $58 - 65\%$ [2] у порівнянні із сушаркою із тепловим насосом $48 - 50\%$ [3].

На п'ятому етапі представлені інноваційні та відновлювальні технології сушіння, що використовують альтернативні джерела енергії, в основному сонячну енергію. Також сюди можна віднести різні типи теплових насосів (адсорбційний, хімічний), комбінації теплового насосу з ґрунтовим теплообмінником та двигуном теплогенератором. Фотоелектрична сушарка із тепловим насосом максимально підвищує ККД до 72% [4], при вдалому об'єднанні роботи двох систем. Тепловий насос з газовим двигуном генератором при утилізації систем відпрацьованих газів та охолодження здатний зменшити витрати теплоти до $3000 - 3500 \text{ кДж/кг}$ вип. вологи [5] при збереженні необхідної продуктивності та якості матеріалу та автономності даної установки.

В Інституті технічної теплофізики НАНУ проведені роботи по створенню енергоефективної сушильної установки із тепловим насосом з додатковими встановленням енергоефективних товстоплівкових нагрівачів. Це дасть змогу підвищити ефективність установки на 20% (прогнозована енергоефективність виходячи із роботи товстоплівкових нагрівачів) (рис. 2).

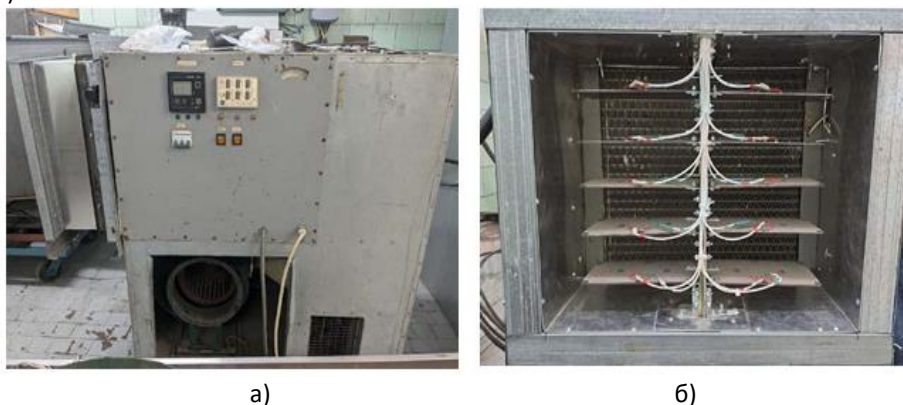


Рис. 2. Модернізація сушильної установки із тепловим насосом (а) та встановлення товстоплівкових нагрівачів загальною ел. потужністю 7 кВт (б)

Дана сушильна установка із тепловим насосом та додатковими нагрівачами під'єднана до сушильної камери із одно-разовим завантаження 10 – 15 кг по вологому матеріалу.

ПОСИЛАННЯ

1. Sniezhkin Yu, Paziuk V., Samoilenko K. Dakhnenko V. Biriukov S. Renewable energy sources in heat pumps for energy efficient low-temperature drying of seed grain. Відроджувальна енергетика №2. 2025, 174 – 181.
2. Baines. P.G. and Carrington. C.G., 1988. Analysis of Rankine cycle heat pump dryers. Int. J. of Energy Research. 12, pp.495-510.
3. Aktaş M, Khanlari A, Aktekeli B, Amini A. Analysis of a new drying chamber for heat pump mint leaves dryer. International Journal of Hydrogen Energy, 42(28). 2017;18034-18044.
4. Morteza pour, H.; Ghobadian, B.; Minaei, S.; Khoshtaghaza, M. H. Saffron Drying with a Heat Pump–Assisted Hybrid Photovoltaic–Thermal Solar Dryer. Drying Technol. 2012, 30, 560–566.
5. Пазюк В.М. Теплотехнічні основи сушіння насіннєвого зерна: дис. д-ра техн. наук. 05.14.06. НАН України, Ін-т техн. теплофізики. – Київ, 2019. – 382 арк.

CHARGE LIMITS FOR HYDROCARBON REFRIGERANTS IN HVACR SYSTEMS IN ACCORDANCE WITH REVISED EN 378:2026 STANDARD

Katarzyna Katana¹, Andrzej Grzebielec²

*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*

Key words: R290, hydrocarbons, refrigerants, charge limits, EN378 standard

ORCID: ¹10009-0000-2007-2456, ²0000-0003-3320-5929

Introduction

Propane (R290) is a natural class A3 refrigerant with negligible global warming potential and favorable thermodynamic properties. However, its flammability imposes additional safety requirements. R290-based refrigeration and air-conditioning equipment is gaining rapid global traction – Midea sold over 6.2 million R290 split air conditioners in 2022, Godrej & Boyce manufactures more than 180,000 units per year in India, and at ISH 2025 Daikin presented its own R290 split unit while Carrier, Viessmann, Clade and Clivet have declared that they started implementing this technology [1-3].

The growing popularity of hydrocarbon-based systems is connected to evolving fluorinated greenhouse gases regulations. In accordance with Regulation (EU) 2024/573, placing on the market of new split air-conditioning and heat pump systems with a rated capacity of 12 kW or less that contain F-gases will be prohibited by 2035 [4]. A similar restriction will apply to monobloc systems, for which the ban will take effect in 2032. Currently in the EU, there are numerous standards addressing the safe use of hydrocarbons, such as: ISO 5149, IEC 60335-2-40, IEC 60335-2-89 or EN 378, which may be difficult to navigate and apply correctly, creating a need for harmonization. The European Committee for Standardization (CEN) is currently revising norm EN 378, with final adoption scheduled for May 2026 as EN 378:2026. The most significant change for equipment manufacturers and end users is the modification of the methodology used to calculate the maximum refrigerant charge for systems using flammable refrigerants compared with the currently applicable EN 378. This paper focuses on this methodology based on the draft prEN 378:2025 [5].

Draft prEN 378:2025.

The draft prEN 378:2025 consists of four parts: prEN 378-1 (definitions, charge limits), prEN 378-2 (design and testing), prEN 378-3 (installation) and prEN 378-5 (refrigerant data). Key changes in Part 1 include: room volume determination, allowable charge calculation, indoor and outdoor design methods, maximum charge limits, the concept of releasable charge, integrated risk-reduction measures, and ambient concentration testing. Rather than a single universal limit, EN 378 provides a calculation method dependent on refrigerant type, room size and equipment category.

Maximum charge calculation method

The draft defines the concentration factor F as well as the representative height h^* as functions of location and system type. Location classes are defined as follows:

- I – The entire system is located in a room occupied by people, e.g., a refrigerator.
- II – The compressor is located in a technical room or outside the building, while part of the installation, including pipes and heat exchangers, is located in a room occupied by people, e.g., split air-conditioning systems and split heat pumps.
- III – All components of the refrigeration system are located outside the building or in a technical room, e.g., air-to-water monoblock heat pumps or brine-to-water heat pumps.
- IV – The entire refrigeration system is located in a ventilated enclosure.

The F -factor accounts for the concentration distribution of refrigerant after a leak. The location classification depends on the placement of system components relative to occupied spaces, while the access classification reflects the degree of public or restricted access to the area where the equipment is installed. These categories remain unchanged compared to the EN 378 standard.

Table 1. Concentration factor F and representative height h^* values by location category and system type per prEN 378:2025.

Location	System type	F	h^*
I	Sealed systems	0.2	Room height
II	Permanently technically tight	0.2	Lowest height of system containing refrigerant
I or III	Circulation airflow	0.35 or 0.5	Room height (0.35 – sealed base; 0.5 – open base)

The maximum refrigerant charge m [kg] is calculated as:

$$m = F \times LFL \times A \times h^* \quad (1)$$

where: F – concentration factor (from Table 1); LFL – lower flammability limit of the refrigerant [kg/m³] (for R290: 0.039 kg/m³); A – floor area of the room [m²]; h^* – representative height [m] (from Table 1).

Maximum refrigerant charge is calculated in accordance with equation no. 1, however, if these limits cannot be higher than presented in Table 2, based on location and accessibility.

Table 2. Charge limits for class 3 refrigerants as a function of location and accessibility category in accordance with draft pr EN378:2025

Accessibility	I	II	III	IV
a	By eq. 1, max 40 m ³ × LFL	By eq. 1, max 80 m ³ × LFL	No limit	Max 300 m ³ × LFL
b	By eq. 1, max 65 m ³ × LFL	By eq. 1, max 80 m ³ × LFL	No limit	Max 300 m ³ × LFL
c	By eq. 1, max 650 m ³ × LFL	By eq. 1, max 650 m ³ × LFL	No limit	Max 650 m ³ × LFL

Accessibility categories are divided into three:

A – rooms for general use with unrestricted public access, e.g., hospitals, hotels, theatres, shops, restaurants, schools.

B – rooms where people work and where a limited number of occupants are present, e.g., offices, laboratories.

C – technical rooms and production halls where only qualified personnel are present, e.g., industrial plants, cold stores, storage areas in supermarkets.

Additionally, if adequate ventilation ensures that the concentration of a category IV refrigerant does not exceed 50% of the LFL, the charge can be twice as high as indicated in Table 2.

Conclusions

The revision of EN 378 introduces a more flexible, risk-based approach for calculating the maximum charge of flammable refrigerants. A key tool in this method is the concentration factor D , which, when used in combination with the LFL parameter, room area, and the reference height h^* allows the permissible charge to be determined in a way tailored to each specific installation. EN 378:2026 is expected to unite the previously diverse requirements of European and international standards, enabling the use of larger amounts of R290 while maintaining the required safety level, thereby supporting the dynamic growth of the hydrocarbon-based equipment market in Europe.

REFERENCES

1. P. Newswire, "Midea's Sets Vision for a Greener Future with Debut of New R290 Product Lineup at IFA 2023," 06 09 2023. [Online]. Available: <https://en.prnasia.com/releases/global/midea-s-sets-vision-for-a-greener-future-with-debut-of-new-r290-product-lineup-at-ifa-2023-417545.shtml>.
2. L. Becker, P. Munzinger, D. de Graaf, R290 Split Air Conditioners Resource Guide, Version 2.02, Bonn/Eschborn, Germany: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH & Umweltbundesamt, Mar. 2025.
3. C. Hayes, "SH 2025: Daikin Expands R290 Portfolio as Part of 'Flexible' Refrigerant Strategy," 02 04 2025. [Online]. Available: <https://naturalrefrigerants.com/ish-2025-daikin-expands-r290-portfolio-as-part-of-flexible-refrigerant-strategy/>.
4. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014.
5. EN/TC 182, Draft prEN 378-1:2026 — Refrigerating systems and heat pumps – Safety and environmental requirements. Part 1: Basic requirements, definitions, classification and selection criteria (Public enquiry version), Brussels, Belgium, Jul. 2025.

ЕКОНОМІЧНІ ІНСТРУМЕНТИ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ МІКРОМЕРЕЖ РЕГІОНУ

Н. Л. Корженівська, Є. О. Пономаренко

*Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
вул. Шевченка, 12, м. Кам'янець-Подільський, 32316, Хмельницька обл., Україна
тел.: (067) 699-34-14, e-mail: korzhenivskanl@pdatu.edu.ua*

Досліджено економічні інструменти, що забезпечують розвиток енергоефективних мікромереж на регіональному рівні в умовах трансформації енергетичного сектору. Обґрунтовано значення фінансових, інституційних та інвестиційних механізмів для стимулювання впровадження мікромереж і підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів у регіональній економіці.

Ключові слова: економічні інструменти, енергоефективність, економічний механізм, ефективність мікромереж

ECONOMIC INSTRUMENTS FOR DEVELOPMENT OF ENERGY EFFICIENT MICROGRIDS IN THE REGION

N. L. Korzhenivska, E. O. Ponomarenko

*Higher Education Institution "Podillia State University"
12 Shevchenko St., Kamianets-Podilskyi, 32316, Khmelnytskyi region, Ukraine
phone: (067) 699-34-14, e-mail: korzhenivskanl@pdatu.edu.ua*

The economic instruments that ensure the development of energy-efficient microgrids at the regional level in the context of energy sector transformation are investigated. The importance of financial, institutional and investment mechanisms for stimulating the implementation of microgrids and increasing the efficiency of energy resources use in the regional economy is substantiated.

Key words: economic instruments, energy efficiency, economic mechanism, microgrid efficiency

ORCID: 0000-0002-4665-6676; 0009-0004-5845-2509.

Сучасний розвиток енергетичної галузі супроводжується переходом до більш гнучких і децентралізованих моделей функціонування систем енергопостачання, що передбачають ефективніше використання ресурсів. Зростання енергетичних ризиків, підвищення вартості енергоресурсів та потреба у зміцненні надійності енергетичної інфраструктури зумовлюють необхідність пошуку нових підходів до організації ефективних енергетичних систем. У цих умовах вагомого значення набуває розвиток мікромереж, як одного з інструментів балансування розподільчої енергомережі, що забезпечують локальне виробництво електроенергії, раціональний розподіл енергетичних потоків та інтеграцію відновлюваних джерел енергії. На регіональному рівні розвиток таких систем стимулює інвестиційну активність, сприяє оновленню енергетичних потужностей і формує додаткові можливості для соціально-економічного розвитку території.

Водночас широке впровадження мікромереж потребує формування сприятливих економічних умов, які стимулюватимуть застосування енергоефективних технологій і залучення інвестицій у розвиток енергетичної інфраструктури. У цьому процесі ключову роль відіграють економічні інструменти, зокрема механізми державної підтримки, інвестиційні стимули, фінансово-тарифні регулятори та інституційні механізми, що визначають умови функціонування та розвитку локальних енергетичних систем.

Інституційний механізм підтримки ВДЕ в національній економіці охоплює нормативно-правове регулювання, міжнародну співпрацю, фінансово-економічні інструменти, інституційну підтримку, наукові дослідження та систему контролю і моніторингу. Під час вибору систем ВДЕ важливо враховувати їх економічну доцільність, строк окупності та потенціал зниження витрат на енергоносії, що дозволяє за допомогою енергоменеджменту визначити найефективніший варіант впровадження [1].

Механізм управління енергетичною безпекою України включає організаційну, функціональну та економічну складові. Зміст економічного механізму полягає у забезпеченні фінансової стійкості енергетичного сектору; функціонуванні інвестиційних та тарифних механізмів; забезпеченні економічної логіки децентралізації та модернізації, інновацій; стимулювання ВДЕ [2]. Етапи побудови механізму формування економічної політики енергоефективності у сфері розвитку мікромереж включає сталий розвиток адміністративно-територіальних одиниць, розвиток і функціонування енергетичної інфраструктури, підвищення енергоефективності та енергозбереження, що дозволяє оптимізувати використання енергоресурсів, зменшити енергетичні витрати, підвищити надійність енергопостачання та сприяти впровадженню інноваційних технологій, одночасно зменшуючи вплив на довкілля й посилюючи енергетичну безпеку та сталий розвиток територій [3].

Економічні інструменти відіграють вирішальну роль у формуванні механізмів розвитку мікромереж, оскільки саме вони визначають фінансову доцільність реалізації відповідних проєктів. Одним із ключових інструментів є тарифна політика, яка створює економічні стимули для виробництва та споживання електроенергії на локальному рівні. Впровадження спеціальних тарифів для електроенергії, виробленої з відновлюваних джерел, забезпечує гарантований попит на таку енергію та підвищує інвестиційну привабливість енергетичних проєктів. Гнучкі або динамічні тарифи також сприяють оптимізації споживання енергії, стимулюючи споживачів переносити використання електроенергії на періоди нижчого навантаження на мережу. Це дозволяє підвищити ефективність функціонування мікромереж та зменшити витрати на балансування енергетичної системи.

Важливим економічним механізмом розвитку мікромереж є інвестиційна підтримка, яка може реалізовуватися через систему податкових пільг, субсидій, грантових програм та пільгового кредитування. Такі інструменти спрямовані на зниження початкових витрат, пов'язаних із впровадженням нових технологій генерації та зберігання енергії. Значна капіталомісткість енергетичних проєктів часто є основним бар'єром для розвитку мікромереж, тому державна фінансова підтримка відіграє важливу роль у стимулюванні інвестиційної активності. Зменшення податкового навантаження для компаній, що впроваджують енергоефективні технології, дозволяє скоротити строк окупності проєктів і підвищити їх економічну ефективність.

Не менш важливим інструментом є механізми державно-приватного партнерства, які забезпечують поєднання ресурсів держави та приватного сектору для реалізації масштабних енергетичних ініціатив. Така форма співпраці дозволяє розподілити фінансові ризики між учасниками проєкту та залучити додаткові інвестиції до модернізації енергетичної інфраструктури. У межах державно-приватного партнерства можливе спільне фінансування будівництва об'єктів генерації, систем накопичення енергії та інтелектуальних систем управління енергоспоживанням. Це сприяє прискоренню впровадження інноваційних технологій та підвищенню ефективності використання енергетичних ресурсів на регіональному рівні.

Важливим напрямом розвитку економічних інструментів є застосування сучасних фінансових механізмів, зокрема зелених облігацій, енергосервісних контрактів та інших інструментів фінансування енергетичних проєктів. Зелені облігації дозволяють залучати кошти інвесторів для реалізації екологічно орієнтованих проєктів, у тому числі пов'язаних із розвитком мікромереж та впровадженням відновлюваних джерел енергії. Енергосервісні контракти, у свою чергу, передбачають фінансування модернізації енергетичних систем за рахунок майбутньої економії енергоресурсів. Такий підхід дає можливість реалізовувати проєкти з підвищення енергоефективності без значних початкових інвестицій з боку споживачів.

Додатковим економічним стимулом для розвитку мікромереж є створення локальних енергетичних кооперативів та енергетичних спільнот, які об'єднують споживачів, виробників і інвесторів. Така модель організації енергетичного ринку дозволяє підвищити рівень участі місцевих громад у виробництві та управлінні енергетичними ресурсами. Водночас вона сприяє формуванню додаткових джерел фінансування енергетичних проєктів та підвищує економічну стійкість локальних енергетичних систем. Завдяки колективному інвестуванню зменшується фінансове навантаження на окремих учасників, що робить реалізацію проєктів більш доступною.

Ефективне використання економічних інструментів розвитку мікромереж має значний вплив на соціально-економічний розвиток регіонів. Підвищення енергоефективності сприяє зниженню витрат на енергопостачання, що позитивно позначається на конкурентоспроможності підприємств і добробуті населення. Крім того, розвиток локальних енергетичних систем стимулює створення нових робочих місць у сфері енергетики, інженерії та інформаційних технологій. Важливим аспектом є також підвищення енергетичної безпеки регіонів, оскільки децентралізовані системи енергопостачання зменшують залежність від централізованих джерел енергії та підвищують стійкість енергетичної інфраструктури до зовнішніх викликів.

Таким чином, розвиток енергоефективних мікромереж значною мірою залежить від комплексного застосування економічних інструментів, спрямованих на стимулювання інвестицій, підтримку інновацій та формування сприятливого регуляторного середовища. Поєднання тарифних механізмів, фінансових стимулів, механізмів державно-

приватного партнерства та сучасних інструментів фінансування створює необхідні передумови для активного впровадження мікромереж у регіональних енергетичних системах. Реалізація таких підходів дозволяє не лише підвищити енергоефективність, але й забезпечити довгостроковий сталий розвиток регіонів у контексті глобального енергетичного переходу.

ПОСИЛАННЯ

1. Цифра Т. Інституційні механізми та фінансові інструменти впровадження відновлюваних джерел енергії при реконструкції житлового фонду. Економіка та суспільство. Вип. 71. 2025. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2025-71-140>.
2. Диха В. Організаційно-економічні основи забезпечення енергетичної безпеки України. Herald of Khmelnytskyi National University. Economic sciences 2025, № 6. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-348-6-9>.
3. Паламарчук Д. М. Механізм формування економічної політики у сфері енергоефективності. Вісник соціально-економічних досліджень, № 2 (77), 2021.

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СВИНЦЕВО-КИСЛОТНИХ АКУМУЛЯТОРІВ
ШЛЯХОМ ЗНИЖЕННЯ ПОЛЯРИЗАЦІЙНИХ ТА КОРОЗІЙНИХ ВТРАТ:
КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА СВИНЦЕВО-ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПЗИТНИХ ЕЛЕКТРОДІВ**

М. В. Костура¹, С. В. Корпач²

*Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України,
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (063) 866-33-29, e-mail: kostyrya_59@i.ua*

Досліджено вплив наномодифікації свинцевих електродів вуглецевими нанотрубками на перебіг електрохімічних процесів та на поляризаційні характеристики і корозійні втрати. Доведено, що використання композиційного покриття сприяє зниженню корозійних втрат свинцевих решіток. Отримані результати свідчать про перспективність застосування таких матеріалів для підвищення ресурсу та енергоефективності свинцево-кислотних акумуляторів.

Ключові слова: свинцевий електрод, наномодифікація, вуглецеві нанотрубки, поляризаційні характеристики, корозійні втрати, свинцево-кислотний акумулятор.

**IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF LEAD-ACID BATTERIES
BY REDUCING POLARIZATION AND CORROSION LOSSES:
A COMPREHENSIVE EVALUATION OF LEAD-CARBON COMPOSITE ELECTRODES**

M. V. Kostyrya¹, S. V. Korpach²

*Institute of Transport Systems and Technologies of National Academy of Sciences of Ukraine,
Pisarzhevskogo, 5, Dnipro, 49005, Ukraine
phone: (063) 866-33-29, e-mail: kostyrya_59@i.ua*

The effect of nanomodification of lead electrodes with carbon nanotubes on the course of electrochemical processes and on polarization characteristics and corrosion losses was investigated. It was proven that the use of a composite coating helps to reduce corrosion losses of lead electrodes. The results obtained indicate the prospects of using such materials to increase the service life and energy efficiency of lead-acid batteries.

Keywords: lead electrode, nanomodification, carbon nanotubes, polarization characteristics, corrosion losses, lead-acid battery.

ORCID: ¹0000-0001-6076-4481, ²0000-0003-4945-9632.

Свинцево-кислотні акумулятори залишаються важливою складовою систем резервного та автономного енергозбереження завдяки низькій вартості, високій надійності та практично повному циклу переробки матеріалів. Водночас їх енергоефективність значною мірою обмежується електрохімічною поляризацією електродів та корозійною деградацією свинцевих решіток, що веде до зростання внутрішнього опору, втрат енергії під час циклу заряд/розряду і скорочення терміну служби батарей [1].

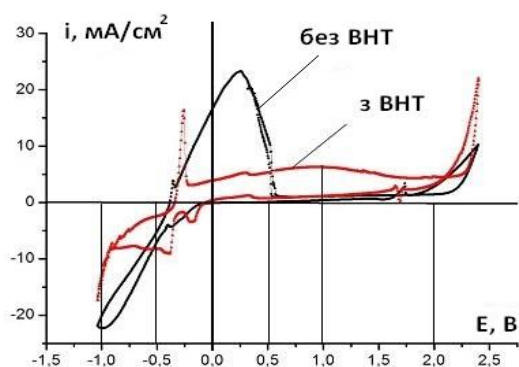
Одним із перспективних напрямів підвищення енергоефективності є використання свинцево-вуглецевих композитів та наномодифікація електродної поверхні, зокрема додавання вуглецевих нанотрубок (ВНТ), здатних формувати провідні структури й впливати на кінетику електродних процесів.

Метою роботи є комплексна оцінка впливу свинцево-вуглецевих композитних покриттів на поляризаційні характеристики та корозійну стійкість свинцевих електродів з позиції підвищення енергоефективності акумуляторних систем. Дослідження здійснювалися на зразках свинцевих електродів із модифікованими композитними покриттями. Поляризаційні криві отримували в заданому діапазоні струмових навантажень із визначенням характеру анодної та катодної поляризації. Корозійну стійкість оцінювали за показниками масових втрат та зміною стану поверхні після витримання в електроліті. Такий комплексний підхід дозволив встановити взаємозв'язок між кінетикою електродних процесів та інтенсивністю корозійної деградації.

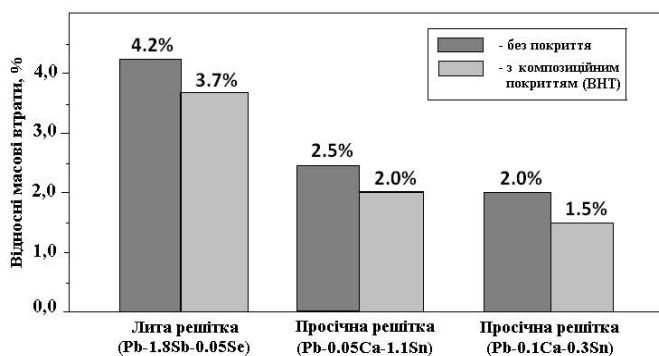
Умови формування оксидного шару суттєво впливають на подальшу стабільність та енергоефективність свинцевого електрода. Для оцінки впливу вуглецевих нанотрубок на перебіг електродних процесів методом циклічної вольтамперометрії проведено дослідження свинцевих осадів, отриманих при щільності струму 2 А/дм^2 . Аналіз здійснювали у першому циклі поляризації в широкому інтервалі потенціалів (рис.1а). Як демонструє рисунок для композиційного осаду Pb-BHT спостерігається більш полого анодна ділянка поляризаційної кривої порівняно з чистим свинцем. Це свідчить про гальмування процесів анодного розчинення свинцю, що є одним з основних факторів корозійного руйнування електродів. Ймовірно, присутність вуглецевих нанотрубок сприяє формуванню більш стабільного шару, який частково пасивує електрод. Зменшення щільності струму в області катодних потенціалів також може свідчити про пригнічення реакції виділення водню, що є небажаним процесом у свинцево-кислотних акумуляторах.

Отримані результати поляризаційних досліджень узгоджуються даними корозійних випробувань. Зменшення інтенсивності анодного розчинення свинцю для композитного матеріалу Pb-BHT корелює зі зниженням відносних масових втрат свинцевих решіток з композиційним покриттям.

Для оцінки впливу наномодифікації на корозійну стійкість свинцевих сплавів акумуляторних решіток проведено дослідження масових втрат акумуляторних решіток різних типів та різного складу за 1 годину випробувань у корозійному середовищі. Порівняння здійснювали для зразків без композиційного покриття та з електрохімічно осадженим свинцево-вуглецевим композитом (рис.1б).



а



б

Рис. 1. Вольтамперограми свинцевих осадів, отриманих при щільності струму 2 А/дм^2 , без BHT та з BHT (перший цикл) (а), відносні масові корозійні втрати свинцевих решіток різних типів без покриття та з композиційним свинцево-вуглецевим покриттям за 1 годину випробувань (б)

Діаграма на рис.1б демонструє зниження корозійних (масових) втрат свинцевих решіток різних типів при використанні композиційного свинцево-вуглецевого покриття. Отримані результати вагових корозійних випробувань узгоджуються з даними поляризаційних досліджень і свідчать про обмеження розвитку корозійних процесів в присутності вуглецевих нанотрубок через зменшення анодної активності свинцю. Як результат зменшення корозійних втрат свинцевих решіток з композиційним покриттям є підвищення їх корозійної стійкості. Найбільш виражений ефект спостерігається для литих решіток, що може бути пов'язано з особливостями її структури та характером взаємодії композиційного покриття з поверхнею матеріалу. Це свідчить про доцільність застосування композиційного покриття для підвищення корозійної стійкості литої решітки.

Таким чином, наномодифікація свинцевих електродів вуглецевими нанотрубками сприяє зміні поляризаційної поведінки електрода та зниженню корозійних втрат свинцю. Використання свинцево-вуглецевого композиційного покриття забезпечує вищу корозійну стійкість свинцевих решіток і створює передумови для збільшення ресурсу та енергоефективності свинцево-кислотних акумуляторів.

ПОСИЛАННЯ

1. Pavlov, D. Lead-Acid Batteries Science and Technology [Text] / D. Pavlov // Elsevier Science. – 2011. – 656 p.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ТЕРМОІНЕРЦІЙНИХ КОНСИСТЕНТНИХ МАТЕРІАЛІВ

Т. Л. Грабова¹, О. Є. Степанова², Д. В. Посулько³

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (096) 294-16-42, e-mail: htplab@ukr.net*

Запропоновано і реалізовано комбінований послідовний спосіб розріджування та обладнання для його реалізації, що дозволило скоротити тривалість теплового впливу та підвищити ефективність інноваційних технологій отримання продуктів на основі консистентних матеріалів.

Ключові слова: *термоінерційність, динамічний стан, термодинамічний метод, зсувні деформації.*

ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES FOR PROCESSING THERMO-INERTIAL CONSISTENT MATERIALS

T. L. Hrabova¹, O. E. Stepanova², D. V. Posunko³

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine,
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (096) 294-16-42, e-mail: htplab@ukr.net*

A combined sequential method of thinning and the equipment for its implementation have been proposed and realized, which made it possible to reduce the duration of thermal exposure and to increase the efficiency of innovative technologies for obtaining products based on consistent materials.

Key words: *thermal inertia, dynamic state, thermal contact method, shear deformations.*

ORCID: ¹0000-0002-5194-2474; ²0000-0002-7179-7251; ³0000-0003-3496-4257.

Консистентні матеріали й системи (мазеподібні, пастоподібні системи), такі як вуглеводневі суміші, високов'язкі аморфні системи, структуровані дисперсні системи, володіють термоінерційними властивостями, бо повільно нагріваються й охолоджуються завдяки високій теплоємності та низькій теплопровідності. Визначальним з точки зору енерговитратності технологій обробки таких систем є комплекс параметрів: тепловий відгук системи, температурна стабільність, термореологічна поведінка, які залежать від внутрішніх структурних перетворень під впливом теплових і деформаційних навантажень. Ефективна реалізація комплексу тепломасообмінних і гідродинамічних процесів, які лежать в основі технологій отримання дисперсних систем на основі консистентних термоінерційних матеріалів, їх циркуляція в технологічному контурі, транспортування систем до різних технологічних операцій залежить від умов створення оптимального динамічного стану дисперсних систем.

Вельми розповсюджена за використанням в різних технологіях така суміш вуглеводнів як вазелін. Вазелін - це структурована дисперсна система, структурний каркас складається з твердих мікрокристалічних вуглеводнів (парафінів та церезинів), в ґратках каркасу утримується рідка олива [1,2]. Вазелін має специфічну сукупність теплофізичних властивостей: достатньо висока прихована теплота плавлення (110–160 кДж/кг), низька теплопровідність зі стрибкоподібною зміною в залежності від температури та достатньо висока об'ємна теплоємність, що характеризує високу термічну інерційність матеріалу. Такі специфічні властивості є визначальними при розробці технологій і істотно впливають на їх енерговитратність:

- широкий інтервал плавлення/застигання (зазвичай 35–60°C) при високій термоінерційності впливає на енерговитратність процесу плавлення й термостатування великого масиву матеріалу, що створює загрозу перегріву в локальних зонах і призводить до синерезису й деструкції;
- витрати енергії під час транспортування та фасування консистентних матеріалів зумовлені не лише необхідністю їх нагрівання, а й руйнуванням внутрішньої структури. При охолодженні до температури нижче 35–40°C на стінках технологічного обладнання і в транспортній системі поступово утворюється дуже стабільний шар, який неможливо зрушити навіть під дією тиску, що призводить до закорковування та застійних зон.

Фахівцями ІТТФ НАН України реалізовано всі фази інноваційного процесу технології отримання дисперсних систем на основі консистентних термоінерційних матеріалів:

- *наукові дослідження* – запропоновані методики аналітичних розрахунків кінетичних параметрів процесу плавлення термоінерційних матеріалів;
- *експериментальні дослідження* – лабораторні дослідження термореології консистентних матеріалів, фізичне моделювання на лабораторних стендах термоконтактного методу плавлення;
- *розробка (проекткування)* – розроблено повний пакет конструкторської документації обладнання для плавлення та обробки дисперсних систем на основі консистентних термоінерційних матеріалів, патентування способів й обладнання для його реалізації;
- *виготовлення та апробація* – авторський надзор за процесом виготовлення, задля оптимізації енерговитрат проведено натурні випробування з тепловізійними дослідженнями та верифікація результатів аналітичних розрахунків з результатами натурних випробувань термоконтактного способу розріджування з динамічним фронтом і примусовим видаленням розплаву консистентної вуглеводневої суміші;
- *впровадження у виробничий процес* – передача технологій підготовки основ, диспергування та гомогенізації дисперсних систем й участь у введенні в експлуатацію обладнання на підприємствах фармацевтичної та харчової галузей промисловості.

Запропонований спосіб термоконтактного плавлення з динамічним фронтом застосовано в тепломасообмінному обладнанні для підготовки основ м'яких лікарських засобів й забезпечує динамічний стан консистентного матеріалу без термодеструкції, і дозволяє його транспортування з високою швидкістю (до 0,02–0,03 л/с) до наступних технологічних операцій. За наявними технологіями консистентний матеріал вивантажують у ванну з гріючою оболонкою та змішувачами або розміщують у нагрівальну камеру і витримують до повного розплавлення всього масиву. Внаслідок термоінерційності вуглеводневих сумішей тривалість процесу плавлення 200 л консистентного матеріалу складає 12...24 години. В розрахунку на 1 кг консистентного матеріалу сумарні енергозатрати можуть скласти 0,25...0,37 кВт·год., що у 1,5...2 рази більше прихованої теплоти плавлення. У розробленій установці тепла енергія підводиться безпосередньо до зони плавлення і рідка фаза одразу відводиться з термоконтактною зоною. При цьому енергозатрати складають 0,2 кВт·год., що тільки на 8 % перевищує значення теплоти плавлення [3-5].

Висновки.

Верифікація алгоритму оцінки кінетичних параметрів процесу плавлення термоінерційних матеріалів показала можливість його застосування для прогнозних розрахунків оптимальних параметрів процесу розрідження термоінерційних матеріалів.

За результатами комплексу досліджень запропоновано оптимальні конструктивно-технологічні рішення для реалізації комбінованого методу розріджування консистентних матеріалів. Для фармацевтичних технологій отримання м'яких лікарських засобів впроваджено комбінований спосіб розріджування: методом термоконтактного нагрівання з динамічним фронтом та примусовим видаленням розплаву і в полі зсувних деформацій, що дозволило скоротити тривалість теплового впливу, підвищити якість кінцевого продукту та ефективність технологічних процесів.

ПОСИЛАННЯ

1. Bao, Q., Morales-Acosta, M. D., & Burgess, D. J. (2020). Physicochemical attributes of white petrolatum from various sources used for ophthalmic ointment formulations. *International Journal of Pharmaceutics*, 583, 119381. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119381>.
2. Boussaba, H., & Lefebvre, G. (2021). Investigation of White Vaseline as an alternative phase change material for thermal regulation of physiological birth rooms. *Journal of Building Engineering*, 44, 102669. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102669>.
3. Грабова Т.Л., Базеєв Р.Є., Посулько Д.В. (2023). Створення динамічного стану дисперсних систем з консистентним середовищем. *Integrated Approach to Science Modernization: Methods, Models and Multidisciplinarity: Proceedings of the VI Correspondence International Scientific and Practical Conference, Grail of Science*, 29. 189–199. <https://doi.org/10.36074/grail-of-science.07.07.2023.030>.
4. Долінський, А.А., Грабова, Т.Л., Степанова, О.Є. (2017). Створення та впровадження ефективних технологій та устаткування для виробництва лікарських засобів. *Теплофізика та Теплоенергетика*, 37(4), 31–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ihe.4.2015.04>.
5. Ободович, О.М., Іваницький, Г.К., Степанова, О.Є. (2021). Моделювання процесів нагрівання та плавлення вуглеводневих сумішей з примусовим видаленням розплаву. *Теплофізика та теплоенергетика*, 43(1), 90–96. <https://doi.org/https://doi.org/10.31472/ttpe.1.2021.11>.

REDUCTION IN THE USAGE OF F-GASES IN THE EUROPEAN UNION OVER THE LAST DECADE

Andrzej Grzebielec¹, Katarzyna Katana²

*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*

The European Union has been working for several decades to reduce greenhouse gas emissions. The goal set for 2050 is to achieve climate neutrality. Greenhouse gases are emitted from a variety of sources, including the combustion of fossil fuels and industrial processes. One of the major sources of emissions are leaks of substances from the group of F-gases with a high Global Warming Potential (GWP). These gases are widely used in refrigeration and air conditioning systems, as well as in high-voltage electrical equipment as non-sparking insulating gases. This article presents how regulations aimed at limiting F-gas emissions have had a real impact on reducing overall emissions.

Key words: *f-gases, CO₂ emission, f-gas regulation, energy efficiency.*

ORCID: ¹0000-0003-3320-5929, ²0009-0000-2007-2456

Introduction

The European Union has been actively regulating fluorinated gases (F-gases) as part of its broader climate and ozone protection policies. A key milestone was the Directive 2006/40/EC, which addressed the use of F-gases in mobile air conditioning systems and set standards to reduce emissions during servicing and disposal. This was complemented by Regulation (EC) No 842/2006, introducing measures to control emissions of F-gases, including leak checks, recovery requirements, and personnel training [1].

The regulatory framework was further strengthened by Regulation (EU) No 517/2014, which established binding phase-down schedules for hydrofluorocarbons (HFCs), enhanced reporting obligations, and stricter enforcement mechanisms [2]. In addition to HFCs, the EU continues to regulate substances that deplete the ozone layer (ODS), including CFCs and HCFCs, under the broader implementation of the Montreal Protocol.

Most recently, Regulation (EU) 2024/573, which entered into force in March 2024, replaced and updated previous F-gas legislation. It establishes comprehensive rules for the production, import, export, use, recovery, reclamation, and destruction of F-gases, including a strengthened phase-down system for HFCs and enhanced monitoring and licensing requirements across the Union. This regulation represents the EU's current main legal instrument to reduce fluorinated gas emissions and achieve its goal of climate neutrality by 2050.

Impact of F-gas regulations on the market

European Union regulations have had a significant impact on the market for fluorinated gases (F-gases). Over the past two decades, the EU has introduced a number of legislative measures aimed at reducing emissions of high-GWP gases and promoting the transition toward more environmentally friendly alternatives. These policies have influenced not only emission levels but also the structure of the market, technological development, and the behavior of stakeholders involved in the production, distribution, and use of F-gases.

From a global perspective, the use of F-gases has decreased significantly. According to the data presented in Figure 1, their consumption has declined by approximately 78 % over the last decade. However, when interpreting these statistics it is important to consider certain market distortions related to regulatory changes. In particular, the year 2014 should be treated with caution, as it coincided with the introduction of a new regulatory framework. In anticipation of the upcoming restrictions, many market participants increased their purchases of refrigerants and other F-gases in advance. This led to a temporary spike in reported consumption and does not accurately reflect the underlying market trend.

For this reason, 2007 is often considered a more appropriate reference point for long-term comparisons, as it represents the first full year following the introduction of early EU regulations addressing F-gas emissions. Between 2007 and 2013, the market remained relatively stable, with consumption levels showing only moderate variation. The more pronounced decline became visible in the following years as stricter regulations, including the phase-down of hydrofluorocarbons (HFCs), began to take effect.

The regulatory framework has also encouraged the development and adoption of alternative technologies, including refrigerants with lower global warming potential as well as natural refrigerants such as carbon dioxide, ammonia, and hydrocarbons. As a result, the EU market has undergone a gradual transformation, with decreasing reliance on high-GWP F-gases and increasing diversification of cooling and electrical technologies. These trends illustrate how regulatory measures can effectively shape market dynamics while contributing to broader climate policy objectives.

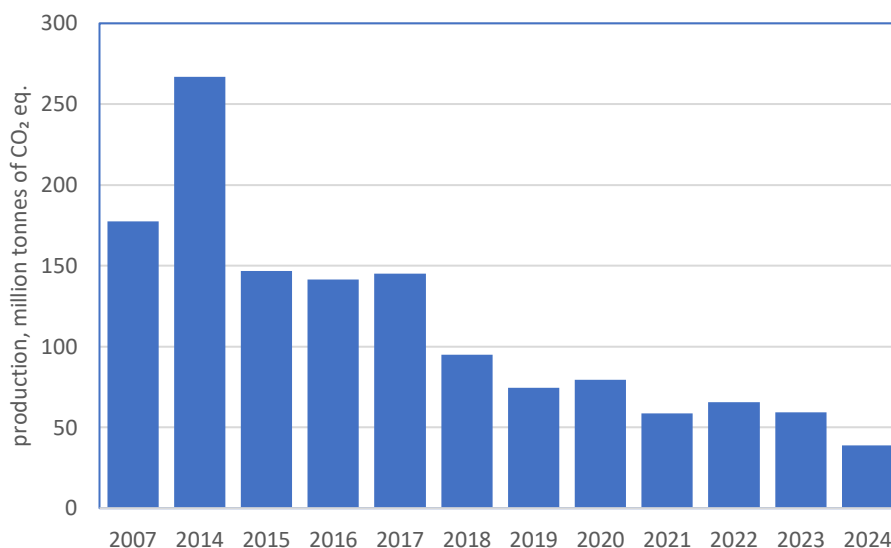


Figure. 1. Consumption of HFCs in EU covered under the Montreal Protocol [4]

Conclusions

The analysis presented in this study indicates that the regulatory framework introduced by the European Union has had a significant and measurable impact on the reduction of fluorinated gas emissions. The gradual tightening of regulations, including restrictions on the use of high-GWP substances, mandatory leak detection, and the phase-down of hydrofluorocarbons (HFCs), has contributed to a substantial decrease in the consumption of these gases over the past decade.

The observed market trends confirm that regulatory measures can effectively influence technological development and encourage the adoption of alternative solutions with lower environmental impact. The increasing availability of low-GWP refrigerants and alternative technologies further supports this transition.

If the current regulatory trajectory is maintained and complemented by continued technological progress and industry adaptation, there is a strong possibility that the European Union will achieve its long-term climate objectives. In particular, the ongoing reduction in F-gas emissions suggests that the EU's broader target of climate neutrality by 2050 is achievable.

REFERENCES

1. Regulation (EC) No 842/2006 of the European Parliament and of the Council of 17 May 2006 on certain fluorinated greenhouse gases (Text with EEA relevance)
2. Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006 Text with EEA relevance
3. Regulation (EU) 2024/573 of the European Parliament and of the Council of 7 February 2024 on fluorinated greenhouse gases, amending Directive (EU) 2019/1937 and repealing Regulation (EU) No 517/2014 (Text with EEA relevance).
4. Sylvie Ludig, Wolfram Jörß and Victoria Brebeck (Öko-Institut). Fluorinated greenhouse gases 2025. Data reported by companies on the production, import, export and destruction of fluorinated greenhouse gases in the European Union, 2007-2024, European Topic Centre on Climate change mitigation, 2025, DOI: 10.5281/zenodo.17551019.

ЕКСЕРГЕТИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ КЕРУВАННЯ КОГЕНЕРАЦІЙНОЮ СИСТЕМОЮ ПИВОВАРНІ З ВИКОРИСТАННЯМ ВАРІАЦІЙНИХ НЕРІВНОСТЕЙ

К. О. Волчанська

Запорізький національний університет,
вул. Університетська, 66, м. Запоріжжя 69600, Україна
тел.: (093) 286-28-86, e-mail: volchanskayakate@gmail.com

У роботі запропоновано метод ексергетичної оптимізації керування когенераційною системою пивоварні з використанням математичного апарату варіаційних нерівностей. Підхід дозволяє враховувати дисипативні властивості реальних середовищ та жорсткі технологічні обмеження, забезпечуючи зниження втрат ексергії на 12–15%. Застосування нерівнісних принципів гарантує стабільність алгоритмів керування в умовах нестационарних теплових навантажень харчового підприємства.

Ключові слова: *варіаційні нерівності, ексергетична оптимізація, когенераційна система, пивоварна галузь, оптимальне керування, втрати ексергії, енергоефективність.*

EXERGY OPTIMIZATION OF COGENERATION SYSTEM CONTROL IN A BREWERY USING VARIATIONAL INEQUALITIES

K. O. Volchanska

Zaporizhzhia National University,
66 Universytetska St, Zaporizhzhia, 69600, Ukraine
tel.: (093) 286-28-86, e-mail: volchanskayakate@gmail.com

The paper proposes a method for the exergy optimization of brewery cogeneration system control using the mathematical apparatus of variational inequalities. This approach accounts for the dissipative properties of real media and strict technological constraints, ensuring a 12–15% reduction in exergy destruction. The application of non-equality principles guarantees the stability of control algorithms under the non-stationary thermal loads typical of food industry enterprises.

Key words: *variational inequalities, exergy optimization, cogeneration system, brewing industry, optimal control, exergy destruction, energy efficiency.*

ORCID: 0009-0009-4432-5310

Харчова промисловість, зокрема пивоваріння, характеризується високим споживанням теплової та електричної енергії на різних етапах технологічного циклу (варіння сусла, пастеризація, охолодження). Впровадження когенераційних систем дозволяє суттєво підвищити енергоефективність підприємств, проте традиційні методи керування за першим законом термодинаміки не враховують якісну деградацію енергії, яка супроводжується зростанням ентропії. Під час процесу спалювання палива в когенераційній установці, енергія димових газів за першим законом термодинаміки залишається високою, але їхня здатність перетворюватися на корисну електричну роботу стрімко падає через незворотність процесу горіння. Також енергетичний баланс розраховується ізольовано для системи. Ексергія визначається відносно параметрів навколишнього середовища. Саме тому ексергетичний підхід дозволяє виявити локалізацію та причини технічної недосконалості системи.

Основна проблема при використанні систем когенерації полягає в узгодженні графіків споживання та виробництва електроенергії і теплоти [1]. Повне узгодження цих графіків можливе лише у виняткових випадках, тому раціональним є визначення пріоритетного режиму роботи системи когенерації: робота за електричним або за тепловим графіком навантажень. Використання варіаційних нерівностей дозволить знайти такий режим керування, де перепад температур у теплообмінниках системи буде мінімально необхідним, що дозволить зберегти «якість» (ексергію) пари для генерації електроенергії в когенераційній системі. Існує суттєве обмеження у застосуванні енергетичного підходу у дослідженні реальних тіл. Варіаційні принципи зазвичай формулюються для ідеальних середовищ з характерними для них рівноважними та зворотними процесами, дисипація енергії у яких обмежена або відсутня взагалі [2].

Традиційні задачі оптимізації енергетичних потоків часто стикаються з проблемою обмежень на фазові координати та керуючі впливи (температурні режими заторних апаратів, тиск пари, витрати палива). У реальних середовищах

з вираженою дисипацією частина корисної роботи незворотно трансформується в теплоту або витрачається на внутрішні структурні зміни (фазові переходи, поверхневу енергію). Внаслідок цього баланс віртуальної роботи зовнішніх сил стає додатним, що вимагає переходу від класичних варіаційних рівнянь до математичного апарату варіаційних нерівностей.

Задача пошуку оптимального режиму роботи когенераційних систем була сформульована як варіаційна нерівність:

$$\langle F(u^*), v - u^* \rangle \geq 0, \forall v \in K,$$

де F – оператор, що описує динаміку ексергетичного балансу;

u^* – оптимальний вектор керування;

v – тестове значення;

K – множина допустимих технологічних режимів.

На прикладі тестової задачі продемонстровано, як саме варіаційна нерівність вирішує конкретну проблему пивоварні, яку не може розв'язати звичайне рівняння. Необхідно підтримувати температурний режим у заторному апараті (пауза 62 °C для оцукрювання). Джерелом тепла є пара від когенераційної установки.

Обмеження:

- температура пари не повинна перевищувати певну межу, щоб не допустити пригорання сусла (фазові зміни та деградація продукту);
- когенераційна установка має ліміт миттєвої теплової потужності, якщо варильний цех забере забагато пари, впаде вироблення електроенергії для інших цехів;
- в теплообміннику відбуваються значні втрати ексергії через різницю температур.

Нехай u – це витрата пари на заторний апарат. Потрібно знайти таку витрату u^* , яка мінімізує функціонал втрат ексергії $I(u)$:

$$\langle \nabla I(u^*), v - u^* \rangle \geq 0, \forall v \in [u_{\min}, u_{\max}],$$

де $F(u^*) = \nabla I(u^*)$ – градієнт втрат ексергії (оператор, що описує, як змінюється «якість» енергії при зміні витрати пари).

$K = [u_{\min}, u_{\max}]$ – множина допустимих режимів.

Ексергетичний аналіз системи показав, що найбільші втрати зосереджені в теплообмінних апаратах та системі скидання низькопотенційного тепла [3]. Використання варіаційних нерівностей замість класичних рівнянь Ейлера-Лагранжа дозволяє коректно враховувати обмеження-нерівності, що виникають через нестаціонарність графіків теплового споживання пивоварні.

Застосування апарату варіаційних нерівностей у задачах ексергетичної оптимізації когенераційних систем дозволяє подолати фундаментальні обмеження класичних методів керування, що базуються на рівняннях рівноваги. Оскільки реальні процеси пивоварного виробництва супроводжуються незворотною дисипацією енергії, саме нерівнісний підхід забезпечує пошук математично обґрунтованого оптимуму на межі допустимих режимів. Це перетворює теоретичну модель на дієвий інструмент автоматизації, який не просто фіксує енергетичні потоки, а динамічно мінімізує деградацію їхньої якості, забезпечуючи стабільну роботу обладнання в умовах дефіциту потужності та змінних навантажень. Запропонований підхід до керування дозволяє знизити сумарні втрати ексергії в системі на 12–15% порівняно зі стандартними стратегіями регулювання. Застосування варіаційних нерівностей забезпечує стійкість алгоритму керування при різних змінах навантаження, що є характерним для циклічних процесів пивоварного виробництва.

ПОСИЛАННЯ

1. Баласанян Г. А. Ефективність перспективних інтегрованих систем енергозабезпечення на базі установок когенерації малої потужності (теоретичні основи, аналіз, оптимізація) : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.14.06 «Технічна теплофізика і промислова теплоенергетика» / Г. А. Баласанян. – Одеса, 2007. – 36 с.
2. Яхно О. М. Ексергійний аналіз та метод варіаційних нерівностей в деяких задачах гідромеханіки / Яхно О. М., Мачуга О. С. // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування : збірник наукових праць. – 2016. – № 3(78). – С. 19–25. DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/2305-9001.2016.78.73382> (дата звернення: 12.03.2026).
3. Волчанська К., Єроф'єва А., Баришенко О., Власов А., Івченко М., Єременко А. (2025). Дослідження каскадної моделі системи рекуперації відхідного тепла димових газів електродугової печі. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101437> (дата звернення: 13.03.2026).

КОМПЛЕКСНА ТЕРМОХІМІЧНА ПЕРЕРОБКА ГУМОВИХ ВІДХОДІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ШИН**С. О. Кіпко¹, К. Є. П'яних²***Інститут газу Національної академії наук України,
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: kipko.s.a@ukr.net*

Розглянуто технологію комплексної термохімічної переробки гумових відходів автомобільних шин з отриманням газоподібних, твердих та рідких продуктів. Запропонований підхід базується на процесі газифікації подрібненої гуми в газогенераторі оберненого процесу при температурах 700–800 °С.

Ключові слова: автомобільні шини, газифікація, гумові відходи, генераторний газ, технічний вуглець, термохімічна переробка.

COMPLEX THERMOCHEMICAL PROCESSING OF RUBBER WASTE FROM AUTOMOBILE TIRES**S. O. Kipko¹, K. Ye. Pyanykh²***Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
39 Dehtyarivska St., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: kipko.s.a@ukr.net*

The technology of complex thermochemical processing of rubber waste from automobile tires with the production of gaseous, solid and liquid products is considered. The proposed approach is based on the gasification of shredded rubber in a downdraft gasifier at temperatures of 700–800 °C.

Keywords: automobile tires, gasification, rubber waste, producer gas, carbon black, thermochemical processing.

ORCID: ¹ 0009-0001-2429-8273, ² 0000-0003-0158-4696

Проблема утилізації відпрацьованих автомобільних шин є актуальною екологічною та енергетичною задачею. Значні обсяги таких відходів накопичуються на полігонах або зберігаються без належної переробки, що створює потенційну небезпеку для довкілля. Загальносвітові запаси зношених автомобільних шин оцінюються в 25 млн т. при щорічному прирості не менше 7 млн т. На європейські країни припадає близько 2 млн т [1]. Існує декілька методів утилізації, які розподіляються на фізичні і хімічні методи. Серед хімічних основними є піроліз, спалювання і крекінг. Фізичні передбачають подрібнення шин за рахунок механічної обробки, в тому числі під дією від'ємних або додатних температур. В Україні, не дивлячись на суттєві супутні екологічні проблеми, найбільш поширеним методом утилізації шин із металокордом на сьогодні є метод низькотемпературного піролізу [2]. При цьому визнається, що методу або технології, яка б дозволяла проводити процес утилізації автомобільних шин при невисоких витратах та з мінімізацією шкідливого впливу на атмосферу, не існує.

В Інституті газу НАН України проводяться дослідження, метою яких є розробка технології комплексної термохімічної переробки гумових відходів автомобільних шин, яка базується на газифікації гуми, з якої вони складаються після видалення металокорду і подрібнення. Технологічним процесом передбачається повітряна газифікація у газогенераторі оберненого процесу. В процесі переробки, яка відбувається за температур 700...800°С, утворюються три продукти, кожен з яких є енергетичним ресурсом, що передбачається використовувати для заміщення викопних палив. З 1 кг подрібненої гуми утворюється 1...1,3 м³ генераторного газу, близько 0,5 кг технічного вуглецю та 0,02...0,05 кг рідких вуглеводнів.

Технічний вуглець – тверді продукти газифікації подрібненої гуми - продукт без запаху з вмістом вуглецю не менше 85%. Аналіз, проведений на лабораторією Дарницької ТЕЦ в ході обговорення можливості використання технічного вуглецю в її котлоагрегатах показав, що енергетичні характеристики цього ресурсу відповідають вимогам, які висуваються для антрациту (Таблиця 1).

Таблиця 1. Характеристики твердих продуктів газифікації гуми автомобільних шин.

W ^r , %	W ^a , %	A ^a , %	A ^d , %	A ^r , %	V ^a , %	V ^{daf} , %	S ^a , %	Q ^r , ккал/кг
2,0	0,7	13,8	13,9	13,6	1,9	2,2	1,76	6806

Опрацьовано методи виготовлення вугільних брикетів з цього технічного вуглецю. Порівняльні випробування роботи водогрійного котла на вугіллі та брикетованому технічному вуглєці показали переваги брикетів по енергетичним показникам, зольності і характеристикам зольного залишку, який не утворював шлаку.

Утилізація шин шляхом спалювання в промислових і енергетичних котлах поширюється в США. Однак визнано, що використання шини виключно в якості енергетичного ресурсу є енерговитратним. Під час виробництва шини витрата енергії становить близько 115 МДж/кг, що в 3-4 рази перевищує тепловий ефект від її спалювання [1]. Саме тому в Інституті вивчається можливість використання технічного вуглецю, виробленого шляхом газифікації подрібненої гуми, що перспективно у різних галузях промисловості [3]. Основною задачею підготовки технічного вуглецю є зменшення вмісту наповнювачів, які при спалюванні технічного вуглецю залишаються у вигляді зольного залишку. Первинна зольність твердих продуктів газифікації подрібненої гуми після процесу газифікації коливається в межах 12...15% в залежності від типу шин. В результаті хімічного видалення включень з використанням соляної кислоти на сьогодні забезпечується зниження зольності до 6...8%. Мета – досягнення показника 1...2%, що зробить якість продукту прийнятною для подальшого використання. Консультації зі спеціалістами – хіміками та пошук економічно обґрунтованої технології продовжуються.

Генераторний газ – продукт повітряної газифікації подрібненої гуми, може бути використаний як заміник природного газу в котлоагрегатах, розрахованих на спалювання природного газу, а також в якості моторного палива в поршневих двигунах стаціонарних когенераційних установок. Характеристики генераторного газу залежать від режиму експлуатації та розміру часток гуми (Таблиця 1).

Таблиця 2. Характеристик газоподібних продуктів газифікації гуми автомобільних шин.

Назва	Формула	розмір 5 мм	розмір 8...12 мм	
Водень	H ₂	9,98	6,62	8,17
Кисень	O ₂	0,115	0,0	0,0
Азот	N ₂	68,0	68,30	65,80
Окис вуглецю	CO	5,89	5,49	6,23
Метан	CH ₄	4,6	7,70	7,40
Діоксид вуглецю	CO ₂	7,0	6,70	6,90
Сірководень	H ₂ S	0,1	0,06	0,01
Етилен	C ₂ H ₄	1,5	1,50	1,80
Ацетилен	C ₂ H ₂	0,03	0,16	0,15
Етан	C ₂ H ₆	0,581	0,48	0,59
Пропілен	C ₃ H ₆	0,33	0,26	0,04
Пропан	C ₃ H ₈	0,02	0,59	0,61
ізо Бутан	iC ₄ H ₁₀	0,27	0,39	0,49
н Бутан	nC ₄ H ₁₀	0,20	0,27	0,43
ізо Пентан	iC ₅ H ₁₂	0,001	1,479	1,379
н Пентан	neo C ₅	0,000	0,003	0,001
Водяна пара	H ₂ O	1,404	1,479	1,379
Теплота згоряння нижча, ккал/м ³		1357	1521	1633

За результатами досліджень визначено, що для заміщення 1 м³ природного газу необхідно газифікувати від 3 до 4 кг подрібненої гуми. Існує можливість використання генераторного газу в якості моторного палива для забезпечення роботи поршневих приводів газових електростанцій. Випробування на дослідно-промисловій газогенераторній електростанції (м. Нетішин) показали надійну роботу установки з генерацією близько 1 кВт електричної енергії з 1 кг подрібненої гуми.

Рідкі вуглеводні, які утворюються в процесі газифікації є рідким пічним паливом – темна високореакційна рідина з різким запахом. Перевірена і підтверджена можливість її використання для заміщення дизельного палива в сушарках асфальтних виробництв. Вивчається можливість використання в якості резервного палива для котлоагрегатів, обладнаних пальниками, розрахованими на спалювання рідкого палива.

ПОСИЛАННЯ:

- Захара І. Я. Аналіз проблематики утилізації та переробки зношених автомобільних шин// Нафтогазова енергетика, 2025, № 1(43), ст.161-170. DOI: 10.31471/1993-9868-2025-1(43)-161-170
- І.А. Шльончак, О.В. Батраченко. Утилізація автомобільних шин в українській перспективі// Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки. 2024. Вип. 10(41), ч.І. с.221-227. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.221-227](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.221-227)
- Чернега В.Ю. Шляхи утилізації відпрацьованих автошин та аналіз можливості використання технічного вуглецю піролізу відпрацьованих автошин//XVII міжнародна науково-практична конференція «Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту». Державний університет «Житомирська політехніка» 21-23 жовтня 2024 р. с.247-249. Режим доступу: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclclefindmkaj/https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/12/247.pdf>

ЕЛЕКТРИЧНИЙ ОБІГРІВ ВЕНТИЛЬОВАНИХ ВІКОН, ЩО ЗАСТОСОВУЮТЬСЯ В СИСТЕМАХ ПОВІТРЯОБМІНУ ПРИМІЩЕНЬ

Б. І. Басок, Д. Б. Давиденко

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (050) 312-46-76, e-mail: borys.basok@gmail.com
тел.: (093) 114-91-79, e-mail: dwalin@ukr.net*

Проведено чисельні дослідження гідродинаміки і перенесення теплоти через вентилявані вікна, що застосовуються в системах повітрообміну приміщень. Для підвищення температури вентиляційного повітря в зимовий період року здійснюється електричний обігрів внутрішніх поверхонь вікна.

Ключові слова: *вентилювані вікна, теплообмін, система повітрообміну, електричний обігрів.*

ELECTRICAL HEATING OF VENTILATED WINDOWS USED IN ROOM AIR EXCHANGE SYSTEMS

B. I. Basok, D. B. Davydenko

*Institute of Engineering Thermophysics National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (050) 312-46-76, e-mail: borys.basok@gmail.com
phone: (093) 114-91-79, e-mail: dwalin@ukr.net*

Numerical studies have been conducted on the hydrodynamics and heat transfer through ventilated windows used in room air exchange systems. To increase the temperature of the ventilation air in the winter, the internal surfaces of the window are electrically heated.

Key words: *ventilated windows, heat transfer, air exchange system, electric heating.*

ORCID: 0000-0002-8935-4248; 0009-0003-5791-1980

Через світлопрозорі конструкції будівлі відбуваються найбільші втрати теплоти з приміщення в зимовий період року. Причина цього полягає у суттєво меншому опорі теплопередачі вікон в порівнянні зі стінами, які можна утеплити. Підвищення опору теплопередачі вікон здійснюється через збільшення камер в склопакеті, нанесення низькоемісійного покриття на внутрішні поверхні скла та за рахунок заміни повітря в камерах склопакета на інертний газ. Підвищення енергетичної ефективності вікон можна також здійснити шляхом їх використання в системах повітрообміну приміщень. Для цього застосовуються вентилявані вікна. Вентилюване вікно може мати вигляд двокамерного склопакета з щільними прорізами у верхніх та нижніх ділянках зовнішнього та внутрішнього скла. У випадку надходження зовнішнього повітря в приміщення через вентиляване вікно в зимовий період року це повітря частково нагрівається від скла. Для досягнення потрібної температури повітря його додатковий підігрів може здійснюватися безпосередньо у вікні, якщо на внутрішні поверхні скла нанести електропровідний шар і пропускати через нього електричний струм. Як такий шар може застосовуватися низькоемісійне покриття.

В даній доповіді представлено результати чисельного моделювання аеродинаміки і теплообміну вентиляваних вікон з електричним підігрівом, які застосовуються для підігріву зовнішнього вентиляційного повітря в зимовий період року. Результати моделювання представлені у вигляді полів швидкості повітряного потоку і розподілу температури в камерах склопакета, а також розподілу густини теплових потоків по поверхнях віконного скла. Ці результати одержані для різних швидкостей подачі повітря у вікно та для різної потужності електричного обігріву. Визначаються обсяги теплоти, що переносяться через вентилявані вікна назовні, і обсяги теплоти, що надходять з вентиляційним повітрям в приміщення. За результатами чисельних досліджень проаналізовано енергетичні переваги застосування вентиляваних вікон з електричним обігрівом в системі повітрообміну.

Робота виконана за сприяння проєкту №2025.06/0054 Інституту технічної теплофізики НАН України «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

АНАЛІЗ ПОТЕНЦІАЛУ ОТРИМАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНОГО МОТОРНОГО ПАЛИВА З ВІДХОДІВ ПЛАСТИКОВИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЗНОШЕНИХ ШИН В УКРАЇНІ

**С. В. Бойченко¹, І. О. Шкільнюк², І. О. Куберський³, Б. Ф. Кочірко⁴,
І. А. Левандовський⁵, К. В. Фута⁶**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
пр-т Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна., тел.: +38(044)204-82-25,
e-mail: chemmotology@ukr.net, i_shkilniuk@iit.kpi.ua

У даному дослідженні виконано аналіз обсягів утворення відходів пластику, поліетилену, зношених шин в Україні та оцінено потенціал отримання альтернативного палива з цих відходів. Пластикові відходи, включаючи поліетиленові, що складають окрему підкатегорію, є однією з найбільших екологічних проблем сучасності. Пластикові відходи забруднюють океани, річки та ґрунти, негативно впливаючи на флору і фауну. Крім того, вони можуть потрапляти в харчовий ланцюг, впливаючи на здоров'я людей і тварин. Автомобільні шини є ще одним значним джерелом забруднення. Гума також розкладається дуже повільно, і при неправильному поводженні утворює токсичні сполуки, можуть забруднювати ґрунт і воду. Ці відходи накопичуються у світі швидкими темпами, і Україна не є винятком, про що свідчить негативна тенденція підвищення рівня відходоємності. Метою даного дослідження є визначення потенціалу отримання вітчизняного альтернативного палива з відходів пластику, поліетилену та відходів зношених шин. Об'єктом дослідження є утилізація відходів пластику, поліетилену та зношених шин. Предметом дослідження – відходи пластику, поліетилену та зношених шин, їх енергетичний потенціал з метою отримання альтернативного палива. Робочою гіпотезою дослідження є те, що налагодження екології збору та перетворення даних відходів здатне частково вирішити енергетичну ситуацію в країні.

Встановлено, що обсяг пластикових відходів, що утворюються в Україні щороку, становить від 990 тис. тонн/рік до 1820 тис. тонн/рік, що в середньому складає – 1405 тис. тонн/рік. Відповідно, обсяги палива, котрі можна отримати від пластикових відходів становить від 297 тис. тонн/рік до 1729 тис.тонн/рік. Щороку неутілізованими залишаються 3–4,1 млн тонн відходів поліетилену. Потенціал отримання палива з поліетиленових відходів становить від 1500 тис. тонн/рік до 3700 тис.тонн/рік. В Україні утворюється 225–360 тис. тонн неутілізованих зношених шин щороку. Потенціал отримання палива від відходів зношених шин складає від 67,5 тис.тонн/рік до 180 тис.тонн/рік. Сумарний очікуваний потенціал отримання моторного палива з відходів пластику, поліетилену та зношених шин складає від 1864,5 тис.тонн/рік до 5609 тис.тонн/рік.

Ключові слова: альтернативні (реформульовані, композиційні) моторні палива, енергетичний потенціал, енергоефективність, ресурсощадність, утилізація пластику, утилізація поліетилену, утилізація зношених шин, екологістика.

ANALYSIS OF THE POTENTIAL FOR PRODUCTION OF ALTERNATIVE MOTOR FUEL FROM WASTE PLASTICS AND POLYETHYLENE AND WASTE TYRES IN UKRAINE

S. Boichenko¹, I. Shkilnyuk², I. Kuberskyi³, B. Kochirko⁴, I. Levandovstkyi⁵, K. Futa⁶

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, tel.: +38(044)204-82-25,
e-mail: chemmotology@ukr.net, i_shkilniuk@iit.kpi.ua

This study analyses the volumes of plastic, polyethylene, and waste tires generated in Ukraine and assesses the potential for obtaining alternative fuels from these wastes. Plastic waste, including polyethylene waste, which constitutes a separate subcategory, is one of the biggest environmental problems of our time. Plastic is durable and resistant to decomposition, which leads to its accumulation in the environment. Plastic waste pollutes the oceans, rivers and soil, adversely affecting flora and fauna. In addition, it can enter the food chain, affecting human and animal health. Car tires are another significant source of pollution. Rubber also decomposes very

slowly and, if not handled properly, produces toxic compounds that can contaminate soil and water. This waste is accumulating rapidly around the world, and Ukraine is no exception, as evidenced by the negative trend of increasing waste intensity. The purpose of this study is to determine the potential for obtaining domestic alternative fuels from waste plastic, polyethylene and waste tires. The object of study is the recycling of waste plastic, polyethylene and waste tires. The subject of the study is waste plastic, polyethylene and worn-out tires, their energy potential for alternative fuel production. The volume of plastic waste generated in Ukraine annually ranges from 990 thousand tons/year to 1820 thousand tons/year, with an average of 1405 thousand tons/year. Accordingly, the amount of fuel that can be obtained from plastic waste ranges from 297 thousand tons/year to 1729 thousand tons/year. Every year, 3–4.1 million tons of polyethylene waste remains unrecycled. The potential for producing fuel from polyethylene waste ranges from 1500 thousand tons per year to 3700 thousand tons per year. Ukraine generates 225–360 thousand tons of unused worn-out tires annually. The potential for obtaining fuel from waste tires ranges from 67.5 thousand tons per year to 180 thousand tons per year. The total expected potential for obtaining motor fuel from waste plastic, polyethylene and waste tires ranges from 1864.5 thousand tons/year to 5609 thousand tons/year, and indicates the need to establish environmental management of these wastes in Ukraine.

Key words: *alternative (reformulated, composite) motor fuels, energy potential, energy efficiency, resource saving, plastic recycling, polyethylene recycling, waste tire recycling, ecologicistic.*

ORCID: ¹0000-0002-2489-4980; ²0000-0002-8808-3570; ³0000-0002-3800-8484

Вступ. Щорічно обсяги сміття зростають жакливими темпами, забруднюючи довкілля, шкодячи здоров'ю людей та завдаючи значних економічних збитків. Вивчення цієї проблеми, аналіз її складових та пошук способів вирішення є надзвичайно актуальними завданнями сьогодення. Відходи є невід'ємною частиною будь-якої економічної діяльності. Правильне поводження з ними є критично важливим для збереження довкілля та здоров'я людей. Серед різних типів відходів особливе місце займають пластикові, поліетиленові, відходи зношених шин, що мають свої особливості та впливають на екосистеми та економіку. З іншого боку, на сьогодні, це цінний енергетичний ресурс, що через перероблення потенційно може надати додаткової кількості енергоресурсів до енергетичного балансу країни, замінюючи, традиційні.

Висновки. На підставі аналізу літератури ми дійшли висновку, що метод низькотемпературного термічного піролізу цих відходів є найбільш раціональним, оскільки він дає змогу отримувати максимальну кількість рідких вуглеводнів для одержання моторних палив і є технічно простим та порівняно з іншими недорогим.

ПОСИЛАННЯ

1. Моторні палива: властивості та якість [текст] підручник / Сергій Бойченко, Андрій Пушак, Петро Топільницький, Казимир Лейда; за заг. ред. проф. С. Бойченка. – К. : «Центр учбової літератури», 2017. – 324 с. <https://ela.kpi.ua/items/aeaafec-d022-4136-a7d1-94f8a23ee2d0>.
2. Альтернативні моторні палива. Властивості та якість: Підручник / С. Бойченко та ін.; за заг. ред. професора С. В. Бойченка. – Київ: «SBA Print», 2026. – 327 с. <https://doi.org/10.20535/978-617-7594-48-1>.
3. Бойченко, С., Жолтайли, С., Шкільнюк, І., Куберський, І., & Левандовський, І. (2024). Аналіз потенціалу отримання композиційного моторного палива з відходів пластику та поліетилену та відходів зношених шин в Україні. Системні дослідження в енергетиці, (4 (80), 41–55. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.041>.
4. Бойченко, С., Шкільнюк, І., Куберський, І. (2025). Алкілбензолна фракція як продукт конверсії відходів – перспективний компонент для продукування екологічних авіаційних бензинів. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences, 351 (3.1), 65–74. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-7>.
5. . Boichenko S., Kuberskyi I., Shkilniuk I., Danilin O., Kryuchkov A., Rozen V., Khotian A., Sokolovska N., Yakovlieva A., Pavlovskiy M. (2024) Prospects of electricity generation through the use of alternative sources such as waste tires processing products. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 5, № 8 (131), 6–21. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.313823>.

УДК 662.7:661.9

СПАЛЮВАННЯ В РЕЖИМІ САМОЗАЙМАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ РІДКИХ ПАЛИВ

В. М. Чмель¹, І. П. Новікова²

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,*

тел.: +38(063)103-30-36, +38(066)780-00-07, e-mail: novikovaines@gmail.com, chmel.valerii@gmail.com

У роботі наведені результати досліджень спалювання альтернативних рідких палив.

Ключові слова: *рідке паливо, самозаймання, піролізне паливо.*

SPONTANEOUS COMBUSTION OF ALTERNATIVE LIQUID FUELS

V. N. Chmel¹, I. P. Novikova²

*Institute of Engineering Thermophysics of National Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057*

phone: +38(063)103-30-36, +38(066)780-00-07, e-mail: novikovaines@gmail.com, chmel.valerii@gmail.com

This paper presents the results of research into the combustion of alternative liquid fuels.

Key words: *liquid fuel, spontaneous combustion, pyrolysis fuel.*

ORCID: ¹0000-0003-1394-7239; ²0000-0001-9612-286X.

Україна є енергодефіцитною країною та покриває свої потреби в паливо енергетичних ресурсах більше чим на 50% за рахунок імпорту. Це веде до енергетичної залежності країни, підвищення собівартості промислової продукції та робить її не конкурентно здатною. Ці обставини вимагають шукати палива альтернативними традиційним: вугіллю, нафті та природному газу, які є головними складовими енергетичного балансу країни [1,2]. Такими альтернативними паливами може бути рослинні жири та продукти піролізу автомобільних шин.

Рослинні жири: пальмова олія, соняшникова олія, рапсова олія та інші мають у своєму складі наявність жирних кислот. Внаслідок чого вони мають майже в 20 разів в'язкість значно вищу ніж продуктів перегонки нафти – бензину, дизпалива, а також викликають хімічний вплив на матеріали трубопроводів та арматури – корозію. Всі вони мають майже однакову теплоту згоряння 35000 – 37000 ккал/кг. Теплота згоряння піролізного палива майже така, як дизельного палива, але воно більш в'язке та має в своєму складі велику кількість смол та дрібних часток пірококсу, які при використанні піролізного палива засмічують форсунки та паливні тракти.

Використання наведених альтернативних палив для заміщення природного газу в паливовикористовуючих пристроях вимагає розробки загального способу спалювання. Таким способом може бути спалювання за методом термохімічної обробки палива [3], або новий, створений на його основі, з врахуванням кінетичних та паливних характеристик альтернативних палив.

Враховуючи наведене, був розроблений двостадійний робочий процес спалювання альтернативного твердого та рідкого палива: перша стадія – доведення палива до температури самозаймання, друга стадія – спалювання в режимі самозаймання в потоці окислювача (повітрі). Коефіцієнт надлишку повітря в першій стадії залежить від теплоти згоряння палива та його властивостей.

Для проведення дослідів була створена модель пальникового пристрою с двостадійним спалюванням палив. В якості дослідних палив були використані соняшникова олія та піролізне паливо – продукт переробки автомобільних шин, а також визначені їх кінетичні та паливні характеристики, що дозволило здійснити спалювання в режимі самозаймання.

При проведенні дослідів був реалізований двостадійний процес спалювання в режимі самозаймання (рис. 1,2). При цьому незважаючи на наявність соняшникової олії вологи, яка виступала як інгібітор процесу горіння факелу полум'я був короткий олія згорала майже повністю (рис. 1). Піролізне паливо (рис.2) згорало майже так саме, як продукти перегонки нафти наявність в пальному залишків пірокарбону інколи створювали треки, які догоряли за межами факелу.

З метою поліпшення розпилю соняшникової олії була створена суміш соняшникової олії та піролізного палива 1:1 (рис.3). При її спалюванні підвищилась повнота згоряння відповідно оксиду вуглецю, що привело до підвищення оксидів нітрогену, в наслідок підвищення температури згоряння.



Рис.1. Горіння соняшникової олії



Рис.2. Факел піролізного палива



Рис.3. Горіння суміші соняшникової олії та піролізного палива 1:1

Було виявлено, що при швидкості горіння першої стадії меншій ніж швидкості горіння в другій стадії – в режимі самозаймання, відбувається інтенсивний релаксаційний процес горіння (рис. 4 а та 4 б). Так, як процес спалювання рідкого палива квазігетерогенний, при періодичній зміні тиску від факелу відриваються молі які горять в потоці самостійно. Для ліквідації релаксації та здійснення стаціонарного процесу горіння нами були застосовані стабілізатори: конусний та дисковий, які встановлювались в кінці початкової ділянки струменя факелу, Це створило додаткове джерело займання в наслідок чого було погашені коливання тиску.



а - піролізне паливо



б - соняшникової олії

Рис. 4. Процес релаксаційного горіння

Таблиця 1. Емісія оксидів нітрогенів та вуглецю

Паливо	NO_x , мг/м^3	CO , %
Соняшникова олія	75	0,07
Соняшникова олія + піролізне паливо	83	0,06
Піролізне паливо	120	0,01

Спалювання рідких палив в режимі самозаймання за двостадійним робочим процесом забезпечує високу повноту згоряння та зменшення шкідливих викидів: оксидів нітрогену та оксидів вуглецю (табл. 1). Однак отримані екологічні показники спалювання рідких альтернативних палив відповідають процесу горіння в відкритому просторі і значно відрізняються від екологічних показників при спалюванні палив в топковому просторі.

На підставі проведених дослідів з врахуванням отриманих результатів та розробленого двостадійного робочого процесу спалювання палива в режимі самозаймання був створений пальниковий пристрій для спалювання твердих та рідких альтернативних палив (Патент на корисну модель №156608 від 18.07.2024р. Бюл. №29 «Пальниковий пристрій» (Рис.5.))

Застосування пальникового пристрою в паливовикористовуючих пристроях дозволить запровадити в паливо енергетичний баланс альтернативне рідке пальне та замінити природний газ.

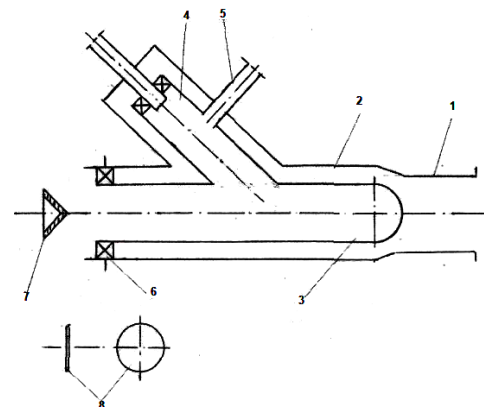


Рис. 5. Пальниковий пристрій

ПОСИЛАННЯ

1. Повышение эффективности сжигания низкосортных топлив методом термохимической обработки, /Чмель В.Н., Дунаевская Н.И. и др. – Известия вузов. Энергетика. 1985, №3, с.96-100.
2. Использование метода термохимической обработки для сжигания низкокачественных углей. Чмель В.Н., Дунаевская Н.И. и др. «Химическая физика процессов горения и взрыва», Проблемы теплоэнергетики. Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву. Черногловка, 1986, с.97.
3. В.Н. Чмель, И.П. Новикова. Сжигание топлива по методу термохимической обработки. //Дисперсні системи. XX наукова конференція країн СНД. 23-27 вересня 2—2 р. Одеса. Україна. Тези доповідей. – Одеса. Астропринт. с. 276-277

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПАЛИВ ТА ПРОДУКТІВ ЗГОРЯННЯ ЯК КРИТЕРІЙ ВИБОРУ ЕФЕКТИВНИХ ПАЛИВ, ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ ДОВКІЛЛЯ ЗА УМОВ ЦИФРОВІЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ

Б. С. Сорока¹, А. В. Лоба^{2*}, Д. І. Федоров³

Інститут газу НАН України

вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна

*Тел.: +380636038298, e-mail: artemlevelup@gmail.com

Представлено та проаналізовано методи та процедури математичного прогнозування теплофізичних та парникових характеристик палива – продуктів газифікації відходів, біо- та сільськогосподарських матеріалів, а також промислових відходів. Порівняння результатів теоретичних розрахунків з даними розрахунків штучного інтелекту (ШІ) показало ідеальний збіг.

Ключові слова: біопаливо, вуглекислий газ, декарбонізація, парниковий газ, пелети, сільськогосподарська сировина, штучний інтелект.

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF FUELS AND COMBUSTION PRODUCTS AS A CRITERIA FOR SELECTING EFFICIENT FUELS, ENVIRONMENTAL DECARBONIZATION UNDER THE CONDITIONS OF DIGITISATION OF CALCULATIONS

B. Soroka¹, A. Lyba^{2*}, D. Fedorov³

The Gas Institute, the NAS of Ukraine,

39, Dehtyarivska St., Kyiv, 03113, Ukraine,

*phone: +380636038298, e-mail: artemlevelup@gmail.com

Methods and procedures for mathematical prediction of thermal and greenhouse characteristics of fuels — products of gasification of wastes, bio- and agricultural materials, as well as industrial waste — are presented and analysed. The comparison of theoretical calculations with artificial intelligence (AI)-based results has shown a high degree of agreement, with perfect coincidence.

Key words: agricultural raw materials, artificial intelligence, biofuels, carbon dioxide, decarbonization, greenhouse gas, pellets.

ORCID: ¹0000-0001-9174-0992; ²0009-0004-5107-6950; ³0009-0007-8291-7486.

Стан питання. Сучасна трансформація паливно-енергетичного комплексу відбувається під впливом глобальних кліматичних обмежень, необхідності підвищення енергоефективності використання палива в промисловості та енергетиці, скорочення витрат органічного палива із забезпеченням декарбонізації довкілля. Одним із ключових напрямів є заміщення органічних (викопних) палив відновлюваними джерелами енергії та альтернативними газами — біогазом, синтез-газом та продуктами газифікації сировини, зокрема сільськогосподарських відходів та промислових викидів [1].

Ефективність та перспективність використання таких палив визначаються їх теплофізичними та екологічними характеристиками, парниковими властивостями та складом продуктів згоряння. Згідно з роботами Інституту газу НАН України (Б.С. Сорока зі співробітниками), вибір палива має базуватися на комплексному врахуванні теплофізичних характеристик палив та продуктів їх згоряння [2, 3]. Для нових палив зазвичай відповідні дані відсутні і потребують розрахункового визначення.

Складність багатокомпонентних сумішевих палив зумовлює необхідність поєднання класичних термодинамічних методів із цифровими підходами при розрахунках, зокрема алгоритмами штучного інтелекту.

1. Сучасні альтернативні палива та їх теплофізичні характеристики. Структура теплової енергетики до початку ХХІ сторіччя визначалась органічними паливами та продуктами їх переробки, включаючи окремі місцеві палива. Починаючи з прийняття міжнародних документів про обмеження споживання С-містких палив, як можливої причини глобальних кліматичних змін, суттєво (особливо в ЄС) скоротилось використання органічного палива в тепловій енергетиці. Але останні 1-2 роки пов'язані з гібридизацією схем, структури та переліку альтернативних палив. Поряд із зеленим воднем розширюється споживання продуктів, одержаних зокрема переробкою сільськогосподар-

ської сировини. Велика кількість з них одержується шляхом газифікації останніх. Зазвичай теплофізичні характеристики таких палив є невідомими і слугували конкретними прикладами при виконанні нашої роботи. До складу основних характеристик таких альтернативних палив після експериментального визначення його складу відносяться:

- молекулярна маса M_f
- теоретична температура горіння T_t - за результатами розрахунків складу та термодинамічних властивостей рівноважної суміші продуктів згоряння
- нижча теплота згоряння LHV, та вища теплота згоряння HHV в:
 - об'ємні, МДж/м³
 - масові, МДж/кг
- числа Воббе (масові, об'ємні):

$$W_{oL} = \frac{LHV}{\sqrt{\rho_r}}, \quad W_{oH} = \frac{HHV}{\sqrt{\rho_r}}$$

- питомі викиди CO₂ (кг/кг, кг/МДж) - одночасно у зв'язку з оцінкою можливих кліматичних змін при використанні палива визначаються викиди парникових газів. Перш за все CO₂

Задача має багатопараметричний і нелінійний характер, що обумовлює використання гібридного підходу:

- аналітичні методи — для фізично обґрунтованих розрахунків;
- ШІ — для інтерполяції, апроксимації та прогнозування.

2. Методика розрахунку. Методика базується на поєднанні класичних термодинамічних залежностей та цифрових методів апроксимації.

Розрахунок теплоти згоряння сумішевого палива та вмісту CO₂ в продуктах його згоряння:

$$LHV = \sum y_i LHV_i$$

$$HHV = \sum y_i HHV_i$$

де y_i — об'ємна доля палива-компонента у сумішевому паливі

Розрахунок викидів CO₂ [4]:

$$n_{CO_2} = \sum y_i \cdot \nu_{C,i}$$

де y_i — мольна (або об'ємна) частка компоненту, $\nu_{C,i}$ — кількість атомів вуглецю в молекулі компоненту.

N_{CO_2i} , $N_{CO_2\text{сум}}$ - кількість моль CO₂ в продуктах згоряння і-го компоненту та сумішевого палива в цілому.

Масовий вихід CO₂:

$$m_{CO_2} = \sum x_i \cdot n_{C,i} \cdot M_{CO_2}$$

де $M_{CO_2} = 44$ кг/кмоль.

Основний кінцевий розрахунковий параметр - питомі викиди CO₂ на 1 МДж LHV або HHV.

Розрахунок температури горіння:

Теоретична температура горіння визначається з енергетичного балансу [1, 2]:

$$Q = \sum n_p \int c_p(T) dT$$

Для визначення теплоємностей використано **NASA polynomials**, що дозволяє врахувати температурну залежність $c_p(T)$.

Інтеграція методів штучного інтелекту. Штучний інтелект, як методологія вирішення проблем ефективного паливовикористання та декарбонізації довкілля. Останнім часом з метою передбачення шляхів розвитку ефективності використання палива та енергії використовуються методологія та програмні продукти штучного інтелекту (ШІ - AI).

Великі мовні моделі (LLM) успішно реалізуються з метою забезпечення ефективних систем енергопостачання. Поширення LLM досягло небаченої швидкості обсягу результативності, різноманітності вирішених задач, методів їх реалізації [5].

Розглянуті 6 складів продуктів газифікації палив, одержаних з відходів сільськогосподарської продукції і промислових викидів, а саме: *пелети з деревини, тріска деревини, пелети з лузги соняшнику, пелети з міскантуса, шкарлупа грецького горіху, гума подрібнена*. На першому етапі порівняно результати точних розрахунків (зазначених у розділі вище), визначених в результаті хроматографічного аналізу з використання Hewlett-Packard 6890 Gas Chromatograph. В межах запропонованої методики методи ШІ використовуються як інструмент цифрової апроксимації:

1. **Інтерполяція**
Побудова залежностей виду:

$$LHV = f(x_i), \quad CO_2 = f(x_i)$$

2. **Регресійна апроксимація**
Для відновлення невідомих значень параметрів на основі частково відомих даних.
3. **Прогнозування нових складів**
Оцінка властивостей палив, для яких відсутні експериментальні дані.

Таким чином, ШІ виконує роль **швидкого предиктора**, що доповнює аналітичні розрахунки [5].

4. **Результати та аналіз точності.** Для оцінки адекватності запропонованого підходу було проведено порівняння результатів:
- **термодинамічних розрахунків** (на основі фундаментальних фізико-хімічних закономірностей);
 - **оцінок, отриманих методами штучного інтелекту** з використанням інтерполяційних розрахунків за поліномами NASA.

Продукти газифікації в подальшому поіменовані як **вторинні палива**. Результати наведені в таблиці 1.

Таблиця 1. Порівняння результатів фундаментальних розрахунків теплофізичних характеристик продуктів згоряння з підходами штучного інтелекту

M_{cp}			T_t			LHV кг			HHV кг			CO ₂ кг/МДж (LHV)		
фунд.	розрах.	Δ, %	точне	розрах.	Δ, %	точне	розрах.	Δ, %	точне	розрах.	Δ, %	точне	розрах.	Δ, %
<i>Пелети з деревини</i>														
26.52	26.50	-0.06	1925	1944	+0.99	5.60	5.61	+0.18	6.11	6.12	+0.13	0.110	0.111	+0.91
<i>Тріска деревини</i>														
25.62	25.62	+0.01	1912	1912	+0.04	5.37	5.37	+0.04	5.89	5.84	-0.74	0.116	0.117	+0.86
<i>Пелети з лузги соняшнику</i>														
24.15	24.15	0	2001	1998	-0.11	6.49	6.49	-0.06	7.12	7.06	-0.83	0.103	0.103	0
<i>Пелети з міскантуса</i>														
25.48	25.48	0	1780	1777	-0.17	4.78	4.79	+0.15	5.41	5.37	-0.70	0.108	0.109	+0.93
<i>Шкарлупа грецького горіху</i>														
25.07	25.01	-0.25	1897	1895	-0.10	4.86	4.99	+2.63	5.30	5.40	+1.91	0.111	0.111	0
<i>Гума подрібнена</i>														
26.36	26.36	0	1829	1829	+0.05	5.52	5.52	-0.02	6.16	6.16	-0.13	0.081	0.080	-1.23

За результатами серії розрахунків встановлено наступні цифрові розбіжності:

- для молекулярної маси M_{cp} — від -0.25% до +0.01 %;
- для теоретичної температури горіння T_t — від -0.17% до +0.99%;
- для теплот згоряння (LHV, HHV) відхилення становить від -0.8% до +0,18% (виключенням є шкарлупа грецького горіху з відхиленням +2.63%);
- для питомих викидів CO₂ продуктів згоряння кг/МДж (LHV) — від -1.23% до +0.93%.

Інтерпретація результатів. Найменше відхилення спостерігається для параметрів, що мають **адитивний характер** (LHV, M_f , CO₂), оскільки вони безпосередньо визначаються з компонентного складу. Найбільші відхилення розрахункових значень від точних спостерігаються для **шкарлупи грецького горіху**, що пояснюється більш складним компонентним складом цього виду біопалива, а також обмеженою репрезентативністю навчальної вибірки для даного типу сировини.

Використання штучного інтелекту та переваги підходу. Аналізуючи накопичений досвід використання ШІ, зроблено висновок про можливість застосування інструментарію ШІ (AI agense) не тільки для виконання рутинних процедур та обчислень, які повторюються, але і для проведення оригінальних інноваційних досліджень, що розкривають нові горизонти у розвитку промислових технологій, включаючи процеси теплової та термохімічної обробки матеріалів.

Передові продукти ШІ визначаються достатньою універсальністю, адекватністю, гнучкістю, швидкістю та точністю. Системний огляд основних переваг та можливостей ШІ, представлений в роботі, вказує на особливі характеристики у випадку оснащення систем термічної обробки матеріалів агентами ШІ. [6]

При цьому в якості переваг штучного інтелекту виступають наступні:

- скорочення часу виконання різноманітних задач
- принципівий безкомпромісний аналіз результатів операцій в умовах варіювання діючих факторів
- відтворює складні залежності;
- виконує інтерполяцію і прогнозування;
- забезпечує **зменшення кількості обчислювальних операцій, часу розрахунку або ресурсів (CPU, пам'ять)** [5].
- До того слід додати можливість безперебійної активності ШІ протягом 24/7 [6]

Висновки. Доведено доцільність застосування комплексного підходу до визначення теплофізичних та екологічних характеристик альтернативних палив, що поєднує класичні термодинамічні методи з цифровими інструментами штучного інтелекту.

Встановлено, що комбінація фундаментальних розрахунків з методами апроксимації засобами ШІ дозволяє з достатньою точністю визначити необхідний набір основних теплофізичних та парникових властивостей палив довільного складу.

Зроблено висновок, що застосування штучного інтелекту як інструменту цифрової апроксимації дозволяє суттєво скоротити час розрахунків, зменшити кількість обчислювальних операцій та забезпечити достатню надійність одержаної інформації.

Таким чином, запропонований підхід може бути ефективно використаний при виборі палив, оцінці їх енергетичної ефективності та екологічних характеристик у задачах декарбонізації енергетики [3, 4].

ПОСИЛАННЯ

1. Afolalu S.A., Yusuf O.O., Abioye A.A., et al. *Biofuel: A Sustainable Renewable Source of Energy – A Review* // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2021. – Vol. 1107. – 012140. - pp.1-10
2. Сорока Б.С. Кліматичні та екологічні засади використання палива, що впливають на зміну тенденцій газопостачання в Європі та Україні. Частина 1. Сучасні вимоги до вибору газових палив. Термодинамічна оцінка основних характеристик газового палива // Енерготехнології та ресурсозбереження. – 2023. – №2. – С. 3–13
3. Сорока Б.С., Згурський В.О. Вибір складу палива для промислових печей з метою скорочення кліматичного впливу. Частина 1. Декарбонізація довкілля при використанні водню в сумішевому паливі в умовах гібридного енергопостачання промисловості // Енерготехнології і ресурсозбереження. – 2025. – №2. – С. 5–20. DOI: 10.33070/etars.2.2025.01.
4. Сорока Б.С., Згурський В.О., Кудрявцев В.С. Зниження викидів CO₂ при використанні сумішевих газових палив у промислових теплотехнологічних процесах // Енерготехнології і ресурсозбереження. – 2023.
5. Sherwin P., Rüker T. AI Agents and EPM: transforming formel processes // Heat Processing. - 2025, №1. - pp. 34-38
6. Mouilleseaux M. Experts anticipate key heat treat technology adoptions // Heat Processing. - 2025, №1. - pp. 50-54

ВИКОРИСТАННЯ СЕС ТА БУФЕРНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЗАРЯДНИХ СТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОМОБІЛІВ

А. М. Терешенко

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна*

Розглянуто використання сонячних електростанцій та буферних накопичувачів енергії у складі зарядних станцій для електромобілів. Показано, що поєднання локальної фотоелектричної генерації, акумулювання енергії та керування режимами заряджання дає змогу зменшувати пікові навантаження на електричну мережу, підвищувати рівень використання локально виробленої електроенергії та покращувати енергоефективність зарядної інфраструктури. Встановлено, що буферні накопичувачі є особливо ефективними для станцій швидкого заряджання, де вони дозволяють згладжувати короткочасні піки потужності, зменшувати потребу у посиленні мережевого приєднання та підвищувати надійність енергозабезпечення.

Ключові слова: зарядні станції електромобілів, сонячні електростанції, буферні накопичувачі енергії, енергоефективність, відновлювані джерела енергії, керування навантаженням.

USE OF PV SYSTEMS AND BUFFER ENERGY STORAGE TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS

A. Tereshenko

*Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
03143, 50 Metrolozhichna St., Kyiv, Ukraine*

The paper considers the use of photovoltaic systems and buffer energy storage as part of electric vehicle charging stations. It is shown that the combination of local photovoltaic generation, energy storage and charging control makes it possible to reduce peak grid loads, increase the use of locally generated electricity and improve the energy efficiency of charging infrastructure. It is established that buffer energy storage is especially effective for fast-charging stations, where it smooths short-term power peaks, reduces the need for grid connection upgrades and increases supply reliability.

Key words: electric vehicle charging stations, photovoltaic systems, buffer energy storage, energy efficiency, renewable energy sources, load management.

Збільшення кількості електромобілів супроводжується швидким розширенням зарядної інфраструктури та зростанням вимог до її енергетичного забезпечення. За даними International Energy Agency, у 2024 році у світі було додано понад 1,3 млн публічних зарядних точок, що більш ніж на 30 % перевищує показник попереднього року [1, 2]. У зв'язку з цим дедалі більшого значення набуває питання підвищення енергоефективності зарядних станцій, особливо швидкісних, для яких характерні значні короткочасні піки споживання потужності [2].

Одним із практичних шляхів розв'язання цієї проблеми є використання сонячних електростанцій у складі зарядних станцій. СЕС дозволяють частково покривати власне споживання, зменшувати відбір електроенергії з мережі та підвищувати частку відновлюваної енергії у процесі заряджання електромобілів [3, 4]. Водночас генерація СЕС є нерівномірною і не завжди збігається в часі з реальним попитом на заряджання, тому застосування лише фотоелектричної генерації не забезпечує стабільної роботи станції [3].

Для компенсації цієї невідповідності доцільно використовувати буферні накопичувачі енергії. Вони дають змогу накопичувати енергію в періоди сонячної генерації або нижчого навантаження мережі та віддавати її під час пікового попиту. Таким чином, накопичувач виконує роль проміжної ланки між мережею, СЕС і зарядним обладнанням, роблячи режим роботи станції більш рівномірним і керованим [4, 5].

Найбільш помітний ефект від використання буферних накопичувачів спостерігається на станціях швидкого заряджання. Системи battery-buffered fast charging можуть зменшувати потребу в мережевій сервісній потужності приблизно на 50–80 % за належного підбору параметрів [5]. Це важливо не лише з технічної, а й з економічної точки

зору, оскільки знижується потреба в дорогому посиленні мережевого приєднання та покращуються умови підключення нових зарядних станцій [5].

Підвищення енергоефективності зарядних станцій при використанні СЕС і буферних накопичувачів проявляється в кількох напрямках. По-перше, зменшується частка споживання електроенергії з мережі у години максимального навантаження. По-друге, підвищується рівень використання локально виробленої сонячної електроенергії. По-третє, згладжується графік споживання потужності, що знижує навантаження на мережу та покращує умови експлуатації зарядної інфраструктури [3–5].

Важливо, що найбільший ефект досягається за умови спільної роботи СЕС, накопичувача та системи енергоменеджменту. Зарядні станції з інтегрованими фотоелектричними системами, накопичувачами та smart energy management мають вищий потенціал щодо адаптації до змінного попиту й ефективнішого розподілу енергії [4]. У такому разі зарядна станція перетворюється на керований енергетичний вузол, здатний гнучко реагувати на зміну режиму роботи мережі, генерації СЕС і потреб користувачів.

Для України використання СЕС та буферних накопичувачів у складі зарядних станцій є особливо актуальним з огляду на потребу зменшення пікових навантажень на розподільчі мережі, підвищення енергетичної стійкості інфраструктури та ширшого впровадження відновлюваних джерел енергії. Найбільш доцільним є розвиток комплексних рішень, у яких СЕС, накопичувач і зарядне обладнання працюють як єдина система з адаптивним керуванням режимами заряджання [4, 5].

Висновок:

Використання СЕС та буферних накопичувачів енергії є дієвим підходом до підвищення енергоефективності зарядних станцій електромобілів. СЕС забезпечують локальне виробництво електроенергії, а буферні накопичувачі компенсують нерівномірність генерації та згладжують короточасні піки споживання. Найбільший ефект досягається за умови їх комплексного використання разом із системами енергоменеджменту, що дозволяє підвищити гнучкість, надійність і загальну ефективність зарядної інфраструктури.

ПОСИЛАННЯ

1. Global EV Outlook 2025. International Energy Agency. Paris, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025> (дата звернення: 30.03.2026).
2. Electric vehicle charging. Global EV Outlook 2025. International Energy Agency. URL: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025/electric-vehicle-charging> (дата звернення: 30.03.2026).
3. Solar Power + Electric Vehicle Charging: Capturing Synergies in Minnesota. National Renewable Energy Laboratory, 2024. URL: <https://docs.nrel.gov/docs/fy24osti/90140.pdf> (дата звернення: 30.03.2026).
4. PV-Powered Electric Vehicle Charging Stations. IEA PVPS, 2025. URL: <https://iea-pvps.org/key-topics/pv-powered-electric-vehicle-charging-stations-2025/> (дата звернення: 30.03.2026).
5. Battery Energy Storage for Electric Vehicle Charging Stations. Joint Office of Energy and Transportation / DriveElectric.gov, 2024. URL: <https://driveelectric.gov/files/battery-buffered-help-sheet.pdf> (дата звернення: 30.03.2026).

УДК 620.9:37.014.54(477.44)

**АНАЛІЗ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ КОМУНАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ
«ВІННИЦЬКИЙ ГУМАНІТАРНИЙ ЛІЦЕЙ №1 ІМЕНІ М.І. ПИРОГОВА»
ТА МОЖЛИВОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

О. В. Коваль

*Комунальний заклад «Вінницький гуманітарний ліцей №1 імені М.І. Пирогова»
вул. Малиновського, 7, м. Вінниця, 21021, Україна,
тел.: (097) 166-05-38, e-mail: o-v-koval@ukr.net*

Дослідження енергоспоживання комунального закладу освіти та визначення шляхів підвищення його енергоефективності є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки сприяє оптимізації використання ресурсів, зменшенню екологічного навантаження та формуванню сучасної енергоефективної моделі функціонування освітніх установ.

Ключові слова: енергоспоживання, енергоефективність, відновлювана енергетика, заклади освіти, електроенергія, енергозбереження, сонячні батареї, сталий розвиток, енергетична безпека, освітнє середовище.

**ANALYSIS OF ENERGY CONSUMPTION OF THE MUNICIPAL INSTITUTION
“VINNYTSIA HUMANITARIAN LYCEUM NO. 1 NAMED AFTER M.I. PYROHOV”
AND THE POSSIBILITIES OF IMPLEMENTING ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGIES**

O .V. Koval

*Municipal Institution “Vinnytsia Humanitarian Lyceum No. 1 named after M.I. Pyrohov”
7 Malynovskoho St., Vinnytsia, 21021, Ukraine
Tel.: (097) 166-05-38, e-mail: o-v-koval@ukr.net*

The study of energy consumption in a municipal educational institution and the identification of ways to improve its energy efficiency are relevant both from scientific and practical perspectives, as they contribute to the optimization of resource use, reduction of environmental impact, and the formation of a modern energy-efficient model for the functioning of educational institutions.

Keywords: energy consumption, energy efficiency, renewable energy, educational institutions, electricity, energy saving, solar panels, sustainable development, energy security, educational environment.

ORCID: [10000-0000-0000-0000](https://orcid.org/10000-0000-0000-0000)

У сучасних умовах трансформації енергетичного сектору та переходу до принципів сталого розвитку проблема ефективного використання енергетичних ресурсів у закладах освіти набуває особливої актуальності. Освітні установи, як значні споживачі енергії, відіграють важливу роль не лише у формуванні енергетичної культури суспільства, але й у впровадженні практичних моделей енергозбереження. У цьому контексті дослідження енергоспоживання комунального закладу «Вінницький гуманітарний ліцей №1 імені М.І. Пирогова», де навчається 1186 осіб, дозволяє комплексно оцінити ефективність використання енергоресурсів та визначити перспективи їх оптимізації.

Будівля ліцею є чотириповерховою, що обумовлює значний обсяг опалювальних і освітлюваних площ. Водночас важливим чинником підвищення енергоефективності є проведена термомодернізація будівлі, зокрема утеплення фасадів, встановлення енергоощадних вікон та покращення теплоізоляційних характеристик огорожувальних конструкцій. Це дозволяє суттєво знизити тепловтрати та оптимізувати витрати теплової енергії в опалювальний період, що є особливо важливим з огляду на кліматичні умови регіону.

Структура енергоспоживання закладу характеризується переважанням витрат електроенергії, яка забезпечує функціонування освітлювальних систем, комп'ютерної техніки, інтерактивного обладнання, систем вентиляції та інших електроприладів. За наявності 1186 користувачів освітнього середовища орієнтовний річний обсяг споживання електроенергії становить 180–220 тис. кВт·год, що відповідає питомому показнику 150–185 кВт·год на одну особу. Середньодобове споживання у навчальний період коливається в межах 800–1000 кВт·год, що відображає значне енергетичне навантаження на інфраструктуру закладу.

Аналіз функціональної структури споживання електроенергії дозволяє встановити, що найбільша її частка припадає на системи освітлення (до 45 %), що пов'язано з тривалим перебуванням учнів і педагогів у приміщеннях та необхідністю дотримання санітарно-гігієнічних норм освітленості. Близько 25–30 % електроенергії використовується для забезпечення роботи інформаційно-комунікаційних технологій, що є невід'ємною складовою сучасного освітнього процесу. Інші витрати пов'язані з функціонуванням допоміжного обладнання та інженерних систем.

Значний вплив на загальний рівень енергоспоживання мають кліматичні умови. Середньомісячні температури у місті Вінниця впродовж навчального року (вересень – червень) становлять: +15 °С у вересні, +9 °С у жовтні, +4 °С у листопаді, –1 °С у грудні, –3 °С у січні, –2 °С у лютому, +3 °С у березні, +10 °С у квітні, +15 °С у травні та +18 °С у червні. Найбільше навантаження на системи опалення припадає на зимові місяці, що обумовлює підвищене споживання енергоресурсів навіть за умов утеплення будівлі.

Важливим напрямом підвищення енергоефективності є впровадження інноваційних технологій, зокрема використання відновлюваних джерел енергії. У ліцеї вже здійснювалися практичні кроки у цьому напрямі: учні та педагогічний колектив брали участь у розробці проєктів щодо встановлення сонячних фотоелектричних панелей. Зокрема, було підготовлено проєкт встановлення сонячних батарей на площі близько 30 м², проведено відповідні техніко-економічні розрахунки, які показали доцільність впровадження такої системи для часткового забезпечення закладу електроенергією.

Згідно з попередніми оцінками, така установка могла б забезпечити вироблення значної частки електроенергії у весняно-літній період та частково компенсувати потреби закладу протягом року, що дозволило б знизити витрати на електроенергію на 20–30 %. Крім економічного ефекту, реалізація цього проєкту мала б вагоме освітнє значення, оскільки сприяла б формуванню у здобувачів освіти практичних навичок у сфері відновлюваної енергетики та екологічної відповідальності.

Однак реалізація проєкту була призупинена у зв'язку з початком повномасштабного вторгнення росії в Україну, що суттєво вплинуло на фінансування освітніх і енергетичних ініціатив. Незважаючи на це, напрацьовані матеріали та проведені розрахунки зберігають свою актуальність і можуть бути використані у майбутньому для відновлення проєкту та його практичної реалізації.

Окрім зазначених заходів, доцільним є впровадження систем автоматичного регулювання температурного режиму в приміщеннях ліцею. Використання програмованих терморегуляторів дозволяє оптимізувати подачу тепла залежно від часу доби та фактичної зайнятості приміщень, що сприяє зменшенню перевитрат теплової енергії. Наприклад, зниження температури у нічний час або у періоди відсутності учнів може забезпечити економію до 10–15 % теплових ресурсів.

Ефективним напрямом енергозбереження є також модернізація систем вентиляції з використанням рекуперації тепла. Такі системи дозволяють зберігати до 60–70 % теплової енергії, яка зазвичай втрачається під час провітрювання приміщень. Це особливо актуально для навчальних кабінетів, де необхідно забезпечувати постійний приплив свіжого повітря без значних тепловтрат.

Важливим заходом є впровадження енергозберігаючого режиму використання комп'ютерної техніки. Використання функцій автоматичного переходу в режим очікування, централізоване вимкнення обладнання після завершення навчального процесу, а також оптимізація роботи серверного обладнання можуть суттєво зменшити споживання електроенергії. За оцінками, такі заходи дозволяють скоротити витрати електроенергії на 5–10 %.

Доцільним є також встановлення інтелектуальних систем обліку електроенергії, які дозволяють здійснювати детальний аналіз споживання в режимі реального часу. Це дає можливість виявляти пікові навантаження, контролювати ефективність використання енергоресурсів та впроваджувати адресні заходи з енергозбереження.

Крім технічних заходів, значний потенціал має організація освітніх і мотиваційних програм для учнів та працівників ліцею. Проведення енергозберігаючих кампаній, конкурсів, проєктної діяльності та впровадження енергетичного моніторингу із залученням учнів сприяє формуванню енергоощадної поведінки. Практика показує, що такі заходи можуть забезпечити додаткове зниження енергоспоживання на 5–7 %.

Таким чином, комунальний заклад «Вінницький гуманітарний ліцей №1 імені М.І. Пирогова» має значний потенціал для впровадження комплексної системи енергозбереження, яка включає технічні, організаційні та освітні заходи. Реалізація запропонованих рішень сприятиме не лише зменшенню витрат енергоресурсів, але й підвищенню екологічної культури учасників освітнього процесу та формуванню сучасної моделі енергоефективного закладу освіти.

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. Енергетична стратегія України до 2050 року : схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 12.01.2024).
7. Державна служба статистики України. Енергоспоживання в Україні : статистичний збірник. – Київ, 2023. – 120 с.
8. Гродзинський М. Д. Основи ландшафтної екології. – Київ : Либідь, 1993. – 224 с.
9. Маринич О. М. Фізична географія України. – Київ : Знання, 2005. – 511 с.
10. Матеріали Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України. URL: <https://mepr.gov.ua> (дата звернення: 10.02.2024).

УДК 621.311

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ДІАГНОСТУВАННЯ СТАНУ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧИХ СИСТЕМ

Розен П. В.¹, Розен В. П.²

Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
тел.: (050) 257-53-70, e-mail: p.v.rozen@gmail.com

В роботі розглянуто вирішення задачі діагностування стану виробничої системи за рівнем енергоефективності яка є типовою задачею двоальтернативного прийняття рішень з ризиком та може бути вирішена в рамках теорії розпізнавання образів.

Ключові слова: енергоефективність, діагностика, теорія розпізнавання образів, енергетичні ресурси

THEORETICAL ASPECTS OF ENERGY EFFICIENCY DIAGNOSTICS IN PRODUCTION SYSTEMS

Rozen P. V.¹, Rozen V. P.²

General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
phone.: (050) 257-53-70, e-mail: p.v.rozen@gmail.com

This paper addresses the problem of diagnosing the state of a production system based on its energy efficiency, which is a typical two-alternative decision-making problem involving risk and can be solved within the framework of pattern recognition theory.

Keywords: energy efficiency, diagnostics, pattern recognition theory, energy resources

ORCID: ¹0009-0003-7934-3398; ²0000-0002-0440-4251.

Вступ. Задача діагностування стану виробничої системи за рівнем енергоефективності є типовою задачею двоальтернативного прийняття рішень з ризиком та може бути вирішена в рамках теорії розпізнавання образів. Запропонований метод експрес-діагностики стану виробничої системи за рівнем енергоефективності є найбільш прийнятний у разі вирішення задачі обґрунтування прийняття рішень щодо впровадження джерел відновлювальної енергетики та енергозберігаючих заходів на промислових підприємств. Своєчасне діагностування кризового стану виробничої системи дає можливість застосування превентивних заходів по попередженню кризи.

Показники, що використовуються для експрес-діагностики найбільш адекватно віддзеркалюють стан виробничої системи.

Мета та завдання:

Підвищення рівня енергоефективності виробничих систем шляхом визначення найефективніших факторів енергозбереження.

Об'єкт та предмет дослідження:

Об'єктом є процеси енергоспоживання енергетичних ресурсів.

Предметом дослідження є показники енергоефективності енергоспоживання виробничих систем.

Математичне формулювання задачі:

З погляду системного підходу кінцевий набір станів виробничої системи як динамічної системи можемо задати за допомогою перехідної функції Φ , яка має такий вигляд:

$$\Phi: T \times X \times U_{n-1} \rightarrow U_n, n = \overline{1, N},$$

де T - множина моментів часу; X - множина вхідних впливів;

U_{n-1} – попередній стан виробничої системи; U_n – наступний стан виробничої системи.

При цьому кожен із станів виробничої системи на деякому часовому відрізку $[t_1, t_2] (t_1, t_2 \in T)$ може бути описано за допомогою функції якості ρ :

$$\rho: X \times Y \rightarrow P,$$

$$Y = (y_1, y_2, \dots, y_m), \quad m = \overline{1, M},$$

де Y - простір ознак станів виробничої системи; $y_1, y_2, \dots, y_m$ - показники діяльності виробничої системи;

P - множина значень показників діяльності виробничої системи.

Тоді вектор значень показників стану виробничої системи за рівнем енергоефективності буде мати такий вигляд:

$$Y_n = \begin{pmatrix} P_{1n} \\ P_{2n} \\ \dots \\ P_{mn} \end{pmatrix} = (P_{1n}, P_{2n}, \dots, P_{mn})^T, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M},$$

де $P_{1n}, P_{2n}, \dots, P_{mn}$ - значення m -го показника діяльності виробничої системи, що відповідає n -му стану виробничої системи.

У загальному вигляді множина станів виробничої системи U може бути зведено до наступних характеристикам "успішність" - "неуспішність":

- успішний стан виробничої системи з енергоефективності характеризує стабільний функціонування виробничої системи під впливом вхідних впливів;
- неуспішний стан виробничої системи з енергоефективності, який характеризується відхиленням показників діяльності у сфері енергозбереження виробничої системи, що свідчать про загрозу або перехід до неуспішного стану.

Таким чином, у разі неенергоефективного використання ПЕР напрямок переходу системи на інтервалі часу T є перехід з успішного стану в неуспішний. Залежність показників енергоефективності виробничої системи від множини вхідних впливів визначається величиною відхилення фактичних показників від їх нормативних значень. В залежності показників енергоефективності виробничої системи від цільових орієнтирів можна назвати такі діапазони значень:

- успішний: відхилення показників енергоефективності, що характеризують різні аспекти функціонування виробничої системи у сфері енергозбереження від їхнього нормативного значення, отже, не потребує коригування управлінського процесу.
- неуспішний: неприпустиме відхилення розрахункових та нормативних значень показників діяльності виробничої системи у сфері енергозбереження.

Перевірка запропонованого методу діагностування стану енергоефективності проводилось на прикладі підприємства харчової промисловості міста Дніпропетровськ, яке досліджувалось у порівнянні із найкращими успішними промисловими підприємствами S_1 , у тому числі з одним ідеальним - $X_1^{(1)}, X_2^{(1)}, X_3^{(1)}$ та найгіршими неуспішними промисловими підприємствами S_2 , у тому числі також з одним ідеальним $X_1^{(2)}, X_2^{(2)}, X_3^{(2)}$. Для діагностування стану промислового підприємства було прийнято показники, які були оцінені за чотирибальною шкалою 0, 1, 2, 3: повнота паспортизації обладнання, дотримання графіків сервісного обслуговування обладнання, наявність служби енергоменеджменту, наявність системи навчання у сфері енергозбереження.

Таким чином, завдання діагностики кризового стану виробничої системи з позиції прийняття обґрунтованих управлінських рішень полягає в аналізуванні та оцінюванні показників на суміжних інтервалах часу, протягом яких здійснюється перехід виробничої системи як системи із одного стану в інший.

Висновки:

Методи розпізнавання образів найбільше пристосовані для вирішення задачі оцінювання стану підприємства з енергоефективності, оскільки прийняття навіть двоальтернативного рішення "успішність" - "неуспішність" потребує аналізування великої кількості показників діяльності підприємства та потребує застосування багатовимірних статистичних методів.

Розроблено алгоритм діагностування стану енергоефективності промислового підприємства який базується на теорії розпізнавання образів і входить до складу математичного забезпечення задач бенчмаркінгу енергоефективності, що дозволило створити програмне забезпечення для вирішення задачі прийняття рішень в умовах використання системи енергетичного аудиту.

СТРУКТУРИЗАЦІЯ ГЕЛІОПАСИВНИХ БУДІВЕЛЬ З ІНТЕГРОВАНИМИ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СИСТЕМАМИ (BIPV) В УМОВАХ ДЕФІЦИТУ ЕНЕРГОПОТУЖНОСТЕЙ

М. В. Одінцов

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

вул. Метрологічна, 50 м. Київ-143, 03143

Тел. 0972028522 e-mail: 11omv11@gmail.com

1. Вступ та актуальність

Сучасна енергетична ситуація в Україні, характеризується суттєвим руйнуванням маневрової генерації та дефіцитом потужності в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС). Згідно аналітичних звітів Dixigroup: З жовтня 2022 по вересень 2024 року рф здійснила понад 1 000 ударів по енергетичній інфраструктурі України, пошкодивши або знищивши всі основні теплові та гідроелектростанції. У результаті окупації та атак протягом 2022-2023 років енергосистема України втратила майже 21 ГВт потужності. У 2024 році втрати від ракетно-дронових кампаній оцінюються у понад 9 ГВт. Окрім генерації, рф також регулярно завдає ударів по критичних вузлах електромереж системи передачі. [1]

Ситуація вимагає докорінного перегляду підходів до проектування житлових, комерційних та громадських будівель. Об'єкти архітектури мають трансформуватися з пасивних споживачів у активні вузли енергосистеми. Особливого значення набуває технологія Building Integrated Photovoltaics (BIPV), яка дозволяє інтегрувати генеруючі елементи безпосередньо в огорожувальні конструкції будівлі.

2. Наукова новизна та зміна підходів

Новизна дослідження полягає у введенні нового контекстного критерію — "енергетичної живучості" об'єкта. На відміну від традиційних методів, що базуються на річних показниках окупності, запропонований підхід орієнтований на забезпечення гарантованого мінімуму енергоспоживання в режимі Off-grid. Зміна енергетичної ситуації призвела до переходу від критеріїв економічної рентабельності до критеріїв енергетичної стійкості в екстремальних умовах [2, 3].

3. Мета роботи

Обґрунтування системи критеріїв енергоефективності та розробка принципів структуризації геліопасивних будівель з BIPV, що забезпечують максимальну автономність в умовах нестабільної роботи централізованих мереж.

4. Методологія: Енергетична щільність фасаду та інших елементів будівлі

Ключовим показником визначено активну енергетичну щільність фасаду (E_{dens}). Розрахунок базується на:

- Корисній генерації з урахуванням вертикальної орієнтації та затінення;
- Коефіцієнті покриття критичного навантаження (K_{crit});
- Погодинних профілях генерації в найбільш несприятливий зимовий період.

5. Структуризація огорожувальних конструкцій

Запропоновано функціональний розподіл поверхні фасаду:

Глухі частини стін (Opaque BIPV): використання вентилязованих фасадних систем для максимальної генерації та створення теплового бар'єра.

Світлопрозорі фасади (Semi-transparent BIPV): застосування полупрозорих модулів у склопакетах, що забезпечують баланс між природним освітленням, пасивним опаленням та генерацією енергії.[4]

6. Висновки

1. Пріоритетним критерієм енергоефективності в Україні стає максимальна енергетична стійкість. [5]
2. Використання критерію енергетичної щільності фасаду дає змогу проектувати будівлі, що є енергетично стійкими незалежно від стану ОЕС.
3. Системна структуризація фасаду забезпечує будівлі статус активного енерговузла, здатного підтримувати життєдіяльність у критичні години.

ПОСИЛАННЯ

1. WINTER SUPPLY OUTLOOK | ELECTRICITY | 2025-2026, ГО «ДІКСІ ГРУП» С. 4.
2. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та розвитку енергетичної інфраструктури України: Закон України від 30.06.2023 № 3220-IX.
3. Про енергетичну ефективність: Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX.
4. Building-Integrated Photovoltaics A Technical: Guidebook, Nuria Martín Chivelet, Costa Kapsis and Francesco Frontini First published 2025 by Routledge ISBN: 978-1-003-43224-1
5. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання: КМУ, РОЗПОРЯДЖЕННЯ від 13 серпня 2024 р. № 761-р

УДК 621.311.25

ЗМЕНШЕННЯ РАДІАЦІЙНОЇ ТЕПЛОВІДДАЧІ ВІД НАГРІТОЇ ПОВЕРХНІ В ДОВКІЛЛЯ

Б. І. Басок¹, В. Г. Демченко²

*Інститут технічної теплофізики НАН України, 03057, м. Київ - 57, вул. Марії Капніст, 2а
тел.: +38(044) 424-96-47; e-mail: borys.basok@gmail.com*

ORCID: 0000-0002-8935-4248; 0000-0002-4211-356X.

Наведено результати експериментальних досліджень ослаблення радіаційної складової теплонаджень від нагрітих об'єктів в довкілля шляхом реалізації відповідних заходів.

Ключові слова: *радіаційний потік, емісивність, випромінювальна здатність, низькоемісійне покриття, метаматеріали, аергель, MXene, спектр випромінювання, термомаскування.*

REDUCTION OF RADIATIONAL HEAT TRANSFER FROM A HEATED SURFACE TO THE ENVIRONMENT

B. I. Basok¹, V. G. Demchenko²

*Institute of Technical Thermophysics of the NASciences of Ukraine, 03057, Kyiv - 57, Marii Kapnist St., 2a
tel.: +38(044) 424-96-47; e-mail: borys.basok@gmail.com*

ORCID: 0000-0002-8935-4248; 0000-0002-4211-356X.

The results of experimental studies on the attenuation of the radiation component of heat transfer from heated objects to the environment by implementing appropriate measures are presented.

Keywords: *radiation flux, emissivity, emissivity, low-emissivity coating, metamaterials, aerogel, MXene, radiation spectrum, thermal masking.*

Наявність сучасних приладів нічної фіксації, що застосовуються для виявлення персоналу та техніки в умовах відсутності освітлення, потребує створення технічних засобів для термомаскування, зокрема шляхом зменшення випромінювальної здатності таких об'єктів. Важливе місце займають наступні прийоми: термоізоляція та обладнання зовнішніх нагрітих поверхонь спеціальними покриттями, створення захисних екранів та реалізація інших підходів, що мають знизити інтенсивність радіаційної тепловіддачі від нагрітого об'єкта.

Метою роботи є проведення експериментальних досліджень теплофізичних ефектів радіаційної тепловіддачі, ефектів термоізоляції, підвищення опору теплопередачі від нагрітих об'єктів, дослідження шляхів і методів зниження інтенсивності інфрачервоного випромінювання нагрітих поверхонь та/або перешкодження його розповсюдженню з безпосередньою фіксацією результатів за допомогою засобів тепловізійного контролю.

Шляхом проведення тепловізійного і термоконттактного обстеження нагрітого об'єкта, обладнаного різними термозахисними покриттями були виконані відповідні експериментальні дослідження. Модельним об'єктом був нагрівальний прилад, що представляє собою електричний нагрівач (радіатор), обладнаний теплоакumuлюючою пластиною з різноваріантним облаштуванням її зовнішньої поверхні. Дослідження проводились в реальних умовах в умовно холодну пору року. За допомогою тепловізора одержано комплект термограм для різних варіантів облаштування зовнішньої поверхні теплоакumuлюючої пластини, спрямованої в сторону довкілля.

За результатами встановлено ефект зменшення радіаційної складової тепловіддачі в довкілля від модельного нагрітого об'єкта, як аналога технічного нагрітого об'єкта, шляхом використання термозахисних пластин з різноваріантними покриттями.

Експериментальні дослідження зосереджені на визначенні кількісних показників випромінювання в інфрачервоному діапазоні нагрітими поверхнями з іншими різними типами покриттів термозахисних пластин з використанням методів теплотрії.

Робота виконується за проектом №2025.06/0054 «Поглинання та перешкодження розповсюдженню електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону та створення засобів для термомаскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України».

ТЕПЛОВОЛОГІСНЕ І БАКТЕРИЦИДНЕ ОБРОБЛЕННЯ ПОВІТРЯ РОЗЧИНАМИ НЕОРГАНІЧНИХ СОЛЕЙ ПРИ СУШІННІ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Ю. Ф. Снежкін¹, Д. М. Чалаєв², Н. О. Дабіжа³

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Булаховського, 2, м. Київ, 03164, Україна,
тел.: (050) 906-41-28, e-mail: dabizha.nataliia@gmail.com*

Проаналізовано ефективність використання водних розчинів неорганічних солей для зневоднення сушильного агента у конвективних сушарках для рослинної сировини. Запропоновано технічне рішення установки для зневоднення термолабільних матеріалів із використанням низькотемпературних джерел теплоти.

Ключові слова: неорганічні солі, абсорбційний термотрансформатор, зневоднення, осушувач повітря, сушіння, термолабільні матеріали.

HEAT, MOISTURE AND BACTERICIDAL AIR TREATMENT WITH INORGANIC SALTS SOLUTIONS IN HEAT-SENSITIVE MATERIALS DRYING

Yu. F. Sniezhkin¹, D. M. Chalaev², N. O. Dabizha³

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine,
2 Bulahovskoho str., Kyiv, Ukraine, 03164
phone: (050) 906-41-28, e-mail: dabizha.nataliia@gmail.com*

The efficiency of using aqueous solutions of inorganic salts to dehydrate the drying agent in convective dryers for plant materials is analyzed. A technical solution for a dehydration system for heat-sensitive materials using low-temperature heat sources is proposed.

Key words: inorganic salts, absorption thermal transformer, dehydration, dehumidifier, drying, heat-sensitive materials.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>; <https://orcid.org/0000-0002-5154-4257>; <https://orcid.org/0000-0001-6124-1981>.

В XXI столітті енергетичний сектор стикнувся з проблемами, що по'язані з дефіцитом енергії, високими та нестабільними цінами на нафту і газ, незбалансованим енергопостачанням. Крім того переважне застосування викопного палива призвело до теплового і хімічного забруднення, викидів парникових газів у атмосферу [1]. В зв'язку з цим людство у русі до сталого розвитку висуває нові вимоги до промислових технологічних процесів щодо енергетичної ефективності та екологічної безпеки. Одним із завдань Цілей Сталого Розвитку [2] є забезпечення створення стійких енергоефективних систем виробництва продуктів харчування на основі інноваційних технологій. Основним технологічним процесом в харчовій та переробній промисловості є сушіння нагрітим повітрям, під час якого відбувається видалення надлишкової вологи з матеріалу до рівня безпечного для зберігання. Для підвищення енергозбереження та енергоефективності технологій сушіння сталим рішенням є використання відновлюваних джерел енергії при нагріванні сушильного агента.

Традиційні конвективні сушильні установки мають ряд недоліків, основними з яких є значні втрати теплоти з вологим відпрацьованим сушильним агентом, залежність ефективності сушіння від вологовмісту атмосферного повітря, а також недостатній ступінь захищеності термолабільного матеріалу, що висушується, від можливого ураження бактеріями і мікроорганізмами, що містяться в навколишньому середовищі, при сушінні в харчовій мікробіологічній та фармацевтичній промисловості. Усунення зазначених недоліків можливе шляхом створення конвективних сушарок із замкнутим контуром циркуляції сушильного агента (без повітрообміну із зовнішнім середовищем) та примусовим його осушуванням за допомогою водних розчинів неорганічних солей, що мають здатність поглинати вологу з повітря.

Як сорбенти, тобто речовини, здатні поглинати водяну пару в системах тепловологістної обробки повітря, сушарках та абсорбційних термотрансформаторах, як правило, застосовують водні розчини LiCl, CaCl₂, MgCl₂, LiBr, LiI і

ряд інших солей. Широке застосування водні розчини неорганічних солей знайшли в абсорбційних термотрансформаторах для отримання штучного холоду, підвищення температурного потенціалу низькотемпературних теплоносіїв та одночасного виробництва теплоти і холоду. Найкращі показники з точки зору сорбційних та теплофізичних властивостей має водний розчин LiBr, але він використовується лише в закритих та вакуумних системах [3]. У відкритих системах застосовують водні розчини LiCl, CaCl₂ та LiI [4]. Водні розчини цих солей не шкідливі для здоров'я людини і мають дозвіл санітарно-гігієнічних служб на використання в системах кондиціювання, крім того вони помірно агресивні до конструкційних матеріалів, значно дешевші в порівнянні з бромистим літієм. Водний розчин хлористого кальцію самий дешевий, нетоксичний і давно відомий сорбент, але його теплофізичні властивості не дозволяють отримати малих парціальних тисків водяної пари, що знижує його осушуючу здатність і обмежує сферу використання.

Особливий інтерес і практичну цінність для тепловологістного оброблення сушильного агента в процесах зневоднення різноманітної сільськогосподарської сировини та харчових продуктів являє водний розчин хлористого літію. Основні його переваги: можливість одержання сухого повітря з кінцевим вологовмістом менше за 10 г/кг с.п.; бактерицидна дія розчину і його безпека для людини (повітря, оброблене цим розчином, має високий ступінь стерилізації, в осушеному повітрі вміст мікроорганізмів знижується на 97%); здатність абсорбувати шкідливі запахи та помірною ціною, що дає істотну економію в первинних витратах у порівнянні з іншими сорбентами. З недоліків водного розчину хлористого літію слід визнати малу розчинність та значну в'язкість, що звужує коло застосування. Для збільшення розчинності водних хлоридних розчинів в системи LiCl – H₂O, CaCl₂ – H₂O, та в їх суміші LiCl – CaCl₂ – H₂O запропоновано вводити добавки нітратів літію та магнію (LiNO₃, Mg(NO₃)₂). Додавання нітрат-іонів не тільки збільшує загальну розчинність солей, але й сприяє зниженню корозійної активності.

Тепловологісна і бактерицидна обробка повітря розчинами неорганічних солей – це комплексний процес, при якому відбувається перенесення теплоти і маси. Інтенсивність потоків маси та теплоти залежить від градієнтів потенціалів перенесення. Потік теплоти залежить від градієнта температури, а потік маси – від градієнта концентрації чи парціального тиску пари рідини, причому процеси тепло- і масопереносу взаємно впливають один на одного. Масообмінний напір взаємодії повітря і рідини визначається різницею парціальних тисків водяної пари в повітрі і над поверхнею рідини. Від різниці потенціалів перенесення між поверхнею рідини і масою повітря, а також між поверхнею і масою рідини залежить інтенсивність тепло- і масообміну і, відповідно, інтенсивність зміни стану повітря. Змінюючи температуру та концентрацію розчину, можна в одноступеневому контактному апараті здійснювати ізотермічне, ізентальпійне, політропне осушення та одержувати повітря необхідних параметрів.

Інститутом технічної теплофізики НАН України розроблено схемні рішення та запропоновано енергоефективне обладнання для конвективних сушильних установок із замкненим контуром циркуляції сушильного агента та його зневодненням за допомогою розчинів неорганічних солей [5, 6]. Застосування замкненого контуру циркуляції теплоносія дозволяє створювати контрольовані процеси зневоднення незалежно від погодних умов, забезпечує високу екологічну чистоту та значно скорочує витрати первинної енергії на вилучення вологи. За такою схемою витрати первинної енергії на вилучення 1 кг вологи при використанні теплової енергії значно скорочуються та становлять менш ніж 3200 кДж/кг. Безсумнівною перевагою системи тепловологісної обробки повітря розчинами неорганічних солей є можливість організації низькотемпературної регенерації розчинів з використанням вторинних і відновлюваних джерел енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Chu S., Majumdar A. Opportunities and challenges for a sustainable energy future. *Nature*. 2012. 488. P. 294–303.
2. Національна доповідь «Цілі Сталого Розвитку: Україна». URL: <https://www.kmu.gov.ua/storage/app/sites/1/natsionalna-dopovid-csr-Ukrainy.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).
3. Krolkowska M., Nedzi F. Experimental data on the physicochemical and thermodynamic properties of the aqueous lithium bromide modified by the addition of lithium salt. *The Journal of Chemical Thermodynamics*. 2021. Vol. 161. 106514.
4. Rafique M., Gandhidasan P., Bahaidarah H. Liquid desiccant materials and dehumidifiers – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 56. P. 179–195.
5. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврін В.С., Шапарь Р.О., Хавін О.О. Комплексне використання геотермальної енергії в агропромисловому секторі. *Енергоефективність процесів сушіння*. Київ: Тропеа, 2021. Т. 2. С. 185–189.

6. Sniezhkin Y. Energy-efficient dryers developed at the Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2025. Vol. 50. № 4. P. 5–17.

УДК 536.2;

ІНВЕРСНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ДЛЯ НЕРУЙНІВНОЇ ОЦІНКИ ДЕГРАДАЦІЇ ВАКУУМНИХ ІЗОЛЯЦІЙНИХ ПАНЕЛЕЙ

А. С. Данішевський

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна
тел. (067) 155-67-11, e-mail: dan1sh@i.ua*

У роботі розглянуто підхід до неруйнівної оцінки стану вакуумних ізоляційних панелей на основі інверсного аналізу теплових процесів. Проаналізовано особливості теплопереносу у вакуумних ізоляційних панелях з урахуванням твердофазної, газової та радіаційної складових ефективної теплопровідності. Представлено математичний опис процесів деградації вакуумного середовища та підхід до ідентифікації теплофізичних характеристик панелі за експериментальними значеннями температур і густини теплових потоків. Наведено результати оцінки ефективного коефіцієнта теплопровідності вакуумних ізоляційних панелей в інтактному та деградованому станах. Встановлено, що втрата вакууму супроводжується суттєвим зростанням ефективної теплопровідності та зниженням теплоізоляційної ефективності панелі. Запропонований підхід може бути використаний для моніторингу технічного стану огорожувальних конструкцій та підвищення достовірності енергетичних аудитів будівель.

Ключові слова: вакуумні ізоляційні панелі, деградація, неруйнівний контроль, енергоефективність, теплопровідність.

INVERSE ANALYSIS OF THERMAL PROCESSES FOR NON-DESTRUCTIVE ASSESSMENT OF VACUUM INSULATION PANEL DEGRADATION

A. Danishevskiy

*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 paper considers an approach to the non-destructive assessment of the condition of vacuum insulation panels based on inverse analysis of thermal processes. The features of heat transfer in vacuum insulation panels are analyzed taking into account the solid-phase, gaseous, and radiative components of the effective thermal conductivity. A mathematical description of vacuum degradation processes and an approach to identifying the thermophysical characteristics of the panel using experimentally obtained temperature values and heat flux densities are presented. The results of evaluating the effective thermal conductivity coefficient of vacuum insulation panels in intact and degraded states are provided. It has been established that vacuum loss is accompanied by a significant increase in effective thermal conductivity and a decrease in the thermal insulation performance of the panel. The proposed approach can be used for monitoring the technical condition of building envelope structures and improving the reliability of building energy audits.

Keywords: vacuum insulation panels, degradation, non-destructive testing, energy efficiency, thermal conductivity.

ORCID: 0000-0002-6166-0999.

В умовах підвищення вимог до енергоефективності будівель особливого значення набуває використання високоєфективних теплоізоляційних матеріалів, зокрема вакуумних ізоляційних панелей (ВІП) [1, 2]. Завдяки наднизьким значенням коефіцієнта теплопровідності вакуумні панелі дозволяють суттєво зменшити теплові втрати через огорожувальні конструкції при мінімальній товщині теплоізоляційного шару [1]. Разом із тим ефективність ВІП значною мірою залежить від стабільності вакуумного середовища всередині панелі. Порушення герметичності оболонки призводить до зростання внутрішнього тиску та інтенсифікації процесів теплопереносу, що супроводжується деградацією теплоізоляційних властивостей [3].

У роботі запропоновано підхід до неруйнівної оцінки стану вакуумних ізоляційних панелей на основі інверсного аналізу теплових процесів. Методика базується на використанні експериментально визначених температурних полів та густини теплових потоків для ідентифікації ефективного коефіцієнта теплопровідності панелі та параметрів її деградації.

Ефективна теплопровідність ВІП розглядається як сума складових:

$$\lambda_{eff} = \lambda_s + \lambda_r(T) + \lambda_g(P_g, \delta), \quad (1)$$

де λ_{eff} - ефективний (узагальнений) коефіцієнт теплопровідності, який враховує всі механізми теплопереносу ВІП; λ_s - теплопровідність твердої матриці ядра; $\lambda_r(T)$ - радіаційна складова теплопереносу; $\lambda_g(P_g, \delta)$ - газова складова теплопровідності, яка залежить від внутрішнього тиску P_g та характерного розміру пор δ .

Для опису процесів деградації використано залежність зміни внутрішнього тиску в часі:

$$P(t) = P_0 e^{\gamma t} \quad (2)$$

де P_0 - початковий тиск, γ - параметр деградації вакуумного середовища.

Інверсна задача формулюється як задача мінімізації різниці між експериментальними та розрахунковими значеннями температур і теплових потоків. Отримані параметри використовуються для оцінки технічного стану панелі та ступеня втрати її теплоізоляційної ефективності.

Експериментальні дослідження виконувались для вакуумних ізоляційних панелей, встановлених у фрагменті огорожувальної конструкції. Аналіз результатів показав, що в інтактному стані ефективний коефіцієнт теплопровідності ВІП становить близько 0,0094 Вт/(м·К), тоді як у разі втрати вакууму значення може зростати до 0,030 - 0,035 Вт/(м·К), що відповідає рівню традиційних теплоізоляційних матеріалів.

Практичне значення роботи полягає у можливості неруйнівної діагностики стану вакуумних ізоляційних панелей без демонтажу конструкції. Запропонований підхід може бути використаний під час енергетичних аудитів будівель, моніторингу технічного стану огорожувальних конструкцій та прогнозування довговічності теплоізоляційних систем. Окрім цього, низька теплопровідність вакуумних панелей може сприяти зменшенню радіаційного теплообміну і помітності нагрітих об'єктів, тому отримані результати можуть бути використані в проєкті №2025.06/0054 «Поглинання та перешкодження розповсюдженню електромагнітного випромінювання інфрачервоного діапазону та створення засобів для термомаскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності і національної безпеки України».

ПОСИЛАННЯ

1. Baetens R., Jelle B. P., Thue J. V., Tenpierik M. J., Grynning S., Uvsløkk S., Gustavsen A. Vacuum insulation panels for building applications: A review and beyond. *Energy and Buildings*. 2010. Vol. 42, Issue 2. P. 147–172. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.005>
2. M. Alam, H. Singh, M.C. Limbachiya, Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry – A review of the contemporary developments and future directions. *Applied Energy*. 2011. Vol. 88, Issue 11. P. 3592–3602. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.04.040.
3. H. Simmler, S. Brunner. Vacuum insulation panels for building application Basic properties, aging mechanisms and service life. *Energy and Buildings* 37 (2005) 1122–1131. DOI:10.1016/j.enbuild.2005.06.015
4. Knudsen Number Kaganer M. G. *Thermal Insulation in Cryogenic Engineering*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1969. 250 p.
5. Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications Tritt T. M. *Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications*. New York: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2004. 290 p.

SEARCHING FOR WAYS TO IMPLEMENT QUANTUM-SIZE EFFECTS IN VARIOUS STRUCTURES OF SILICON SOLAR CELLS

R. Aliev

Andijan State University, 129 University str., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (99890) 216-72-60, e-mail: alievuz@yahoo.com

Annotation: *The development trends of semiconductor photovoltaics are analyzed, and the specific features of innovative methods for increasing solar cell (SC) efficiency through the implementation of quantum size effects are identified. Using the "Sentaurus TCAD" modeling method, spherical nanoparticles of various metals were formed in the emitter layer of planar and bifacial silicon solar cells. Optimal conditions for implementing the nanoplasmonics effect, which enables significant improvements in the key photovoltaic parameters of the studied structures, are determined.*

Key words: *Silicon solar cell, emitter layer, texture, metal nanoparticle, nanoplasmonics effect, Sentaurus TCAD, bifacial solar cell.*

ORCID: 10000-0002-7375-727X

The main trends in the development of global semiconductor solar photovoltaics over the past few years have been characterized by a gradual transition from first-generation to second-generation and then third-generation solar cells. This change indicates that semiconductor solar photovoltaics is experiencing the most rapid growth among renewable energy sectors overall. The cost of solar energy production is significantly approaching the price of traditional electricity. The efficiency development sequences of modern solar cells manufactured using various semiconductor materials, incorporating innovative technological and technical solutions, are characterized. The potential for applying advances in nanotechnology and nanomaterials to modern photovoltaic technology is emphasized. The authors of [1] identified four technological stages in the development of photovoltaics. The advantages and disadvantages of solar cells manufactured at each stage of development are assessed, including the specifics of their production and development prospects.

One of the most promising areas for the development of modern high-efficiency single-junction solar cells is the introduction of fundamentally new materials with nanoheterostructures containing quantum dots (QDs). The absorption properties of such structures, both short-wavelength and long-wavelength solar radiation, demonstrate the feasibility of exploiting quantum-size effects to achieve high solar cell photovoltaic conversion efficiency. Optimal materials for their fabrication and the operating principles of high-efficiency solar cells based on them are also considered. The prospects of fabricating nanoheteroepitaxial structures with QDs using liquid-phase epitaxy with pulsed substrate cooling are scientifically substantiated [1].

A number of other innovative quantum-size effects, related to the theoretical manifestation of the nanoplasmonics effect, the hot carrier effect, and the flexophotovoltaic effect, can also be used to enhance the performance of semiconductor solar cells, provided their physical mechanisms and implementation technologies are sufficiently understood. Practical implementation of such quantum-size effects in semiconductor solar photovoltaics requires targeted applied research. In this regard, it is advisable to utilize the capabilities of digital modeling [2]. In the Renewable Energy Laboratory, spherical nanoparticles of various metals were formed in the emitter layer of traditional planar silicon solar cells using the Sentaurus TCAD modeling method, and optimal conditions for implementing the nanoplasmonics effect were determined, allowing for a significant improvement in their main photovoltaic parameters.

In particular, we note the importance of the shape of metal nanoparticles. Modeling results for various metal nanoparticles (NP) shapes have demonstrated a clear advantage of their spherical shape [3]. Naturally, the type of metal, which determines the electron work function from the NP surface into silicon, the size of the NPs, their distribution within the silicon bulk, and their localization within the SC structure are important parameters influencing the manifestation of the nanoplasmonics effect. These parameters were optimized for planar single-sided silicon SCs in [4].

It is known that the optical properties of semiconductor solar cells can be improved by texturing, in particular pyramidal texturing, achieved by chemical etching in an alkaline solution. The authors of [5] investigated the influence of nanoparticles of various metals on the main photovoltaic parameters of silicon solar cells with a textured front surface. As a result, optimal conditions for the introduction of spherical NPs of various metals (Al, Cu, Ni, Ag, Au, Pt) with different diameters, distribution and localization in different structural elements (in the optical antireflective layer, on the surface in the emitter, in the base and on the back surface) were determined in order to improve the main photovoltaic parameters of planar and textured silicon solar cells.

In recent years, research into double-sided illuminated (DSI) silicon solar cells has significantly increased. Interest in these solar cells and the solar panels (SPs) made from them stems from their rear side being translucent (the solid metal rear electrode is a grid), generating additional photocurrent by absorbing diffuse radiation. The contribution of the rear side to the total photocurrent of DSI SCs currently ranges from 5% to 35%. According to theoretical concepts, optimal design of DSI SCs could increase generated power by up to 80%. This concept underscores the practical importance of DSI SC development in the future.

Therefore, the study of the influence of various metal nanoparticles on the key photovoltaic parameters of silicon DO SCs is considered highly relevant, and this is the focus of this work. In this work, the optical properties of silicon DO SCs with an n^+p-p^+ structure were studied using numerical modeling in the Sentaurus TCAD environment [6]. Various metal nanoparticles were embedded in the emitter layer to analyze their influence on the optical absorption and reflection of solar radiation.

An analysis of the influence of platinum (Pt), gold (Au), silver (Ag), aluminum (Al), and copper (Cu) nanoparticles on absorption and reflectance was performed. NPs with a diameter of 5 nm were simulated, and the current-voltage characteristics (I–V) were calculated for each solar cell with a specific type of metal nanoparticle. The calculation results showed that platinum nanoparticles provided the highest short-circuit photocurrent density of 13.8 mA/cm², while silver nanoparticles demonstrated the lowest—5.027 mA/cm².

It was found that the photon absorption density in the solar cell for the most efficient metal type was 1.81 times higher than that of the solar cell without any metal NPs. Furthermore, the spectral sensitivity curve of silicon shifted toward the ultraviolet range in the presence of metal NPs. Improved utilization of the visible spectrum was also observed, and the overall absorption coefficient of the solar cell increased by 1.33 times due to the metal NPs.

Thus, the results of implementing the quantum-size effect of nanoplasmonics in planar single-sided and double-sided illuminated silicon solar cells are presented and compared. The results demonstrate the potential for studying the temperature properties of DO SCs with metal nanoparticles to expand their potential for implementation in higher ambient temperatures.

REFERENCES

1. Maronchuk, I. I. Solnechnyye elementy: sovremennoye sostoyaniye i perspektivy razvitiya. // I. I. Maronchuk, D. D. Sanikovich, V. I. Mironchuk // Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedeniy i energ. ob"yedineniy SNG. 2019. V. 62, № 2. PP. 105–123. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2019-62-2-105-123>
2. SentaurusTM Device User Guide O-2018.06. 2018. -1530.
3. J.Gulomov, R.Aliev, M.Nasirov, J.Ziyoitdinov. Modeling metal nanoparticles influence to properties of silicon solar cells. // International journal of Advanced Research (IJAR) 2020, 8(11) (336-345 pp.). <http://dx.doi.org/10.21474/IJAR01/12015>
4. R.Aliev, J.Gulomov, M.K.Abduvohidov, S.Aliev, Zh.Ziyaitdinov, N.Yuldasheva. Stimulation of Photoactive Absorption of Sunlight in Thin Layers of Silicon Structures by Metal Nanoparticles. // Applied Solar Energy, 2020, 56, (364-370 pp.). <https://link.springer.com/article/10.3103%2FS0003701X20050035>, <https://doi.org/10.3103/S0003701X20050035> ISSN: 2576-4543
5. Aliev R., Komilov M., Gulomova I., Mirzaalimov A., Mirzaalimov N., Aliev S., Gulomov J. Effect of temperature on the properties of a bifacial textured solar cell. // Відновлювана енергетика. №2/2025 | Сонячна енергетика. PP. 97-105. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\)97-105](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81)97-105)
6. M.M. Komilov, R. Aliev, A.A. Mirzaalimov, S.R. Aliev, M.K. Abduvohidov, N.A. Mirzaalimov, J. Ziyoitdinov, S.I. Temirov. Enhancing and optimizing optical properties of bifacial solar cells by incorporating metal nanoparticles. // East Eur. J. Phys. 4, 291-297 (2025), <https://doi.org/10.26565/2312-4334-2025-4-27>

SYNERGISTIC FORMATION OF OUTPUT PHOTOVOLTAIC CHARACTERISTICS OF POLYCRYSTALLINE SILICON STRUCTURES UNDER CONDITIONS OF HIGH SOLAR RADIATION

R. Aliev¹, M. Alinazarova², D. Khonbutaeva³

Andijan State University, 129 University Str., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (99890) 216-72-60, e-mail: alievuz@yahoo.com

Annotation: Using Python and MATLAB/Simulink software and experimentally determined physical characteristics, this study evaluates the changes in the key photovoltaic parameters of polycrystalline silicon structures under varying temperature and solar radiation intensity.

Keywords: polycrystalline silicon, photovoltaic parameters, current-voltage characteristic (CVC), maximum power, power-voltage characteristic.

ORCID: ¹0000-0002-7375-727X, ²0009-0006-5136-5589, ³0009-0001-9044-3117

In this study, a dual-platform computational framework combining numerical I-V characteristic analysis with three-dimensional (3D) parametric visualization is proposed to systematically elucidate the role of diode non-ideality in polycrystalline silicon-based solar cells. A robust MATLAB-based numerical framework is used to accurately solve the transcendental equations describing the performance of a single diode model (SDM), allowing for a robust analysis of the non-ideality of the device [1]. A multivariate surface modeling approach using Python was used to visualize the power degradation as a function of temperature. As a result, information was obtained on the combined effects of operating conditions and diode non-ideality factor. In order to determine the role of the material from which the solar cell is made, a solar cell made of monocrystalline silicon was also studied, along with polycrystalline silicon. This approach made it possible to comparatively evaluate the recombination mechanisms in the solar cell volume. The I-V characteristics of two types of solar cells measured on the Sinton Instrument Suns-V_{oc} device and the main photovoltaic parameters determined with their help were used as experimental data.

To overcome a number of limitations in the literature, this study has implemented a comprehensive computational strategy that combines numerical robustness with experimental verification. Newton's iterative method is used in MATLAB to solve the implicit SDM equation and analyze the sensitivity of output parameters to changes in diode ideality factor under different series resistance, shunt resistance, photocurrent, and saturation current conditions [2]. In parallel, Python-based 3D surface mapping algorithms have been developed to visualize the combined effects of temperature and ideality factor on output power for monocrystalline and polycrystalline silicon solar cells. The simulation results allow us to predict the maximum power degradation associated with the short-circuit current, open circuit voltage, and non-ideal diode performance of the solar cell. Through this integrated approach, the study will explain the differences between the I-V characteristics of mono-Si and poly-Si based solar cells with the recombination mechanisms observed in them, and through the clear quantitative differences, will lead to the formulation of practical conclusions relevant to the preparation and operation of photovoltaic devices.

The results and scientific conclusions obtained in the study will serve to develop important and physically based practical recommendations for the further development of silicon-based photovoltaic technologies. In particular, through rigorous numerical modeling, it will be possible to understand and put into practice mechanisms for predicting climatic conditions and solar panel output parameters depending on the change in the non-ideality factor of a solar cell under the influence of external climatic parameters.

REFERENCES

1. T. Wang et al., "Diode Factor in Solar Cells with Metastable Defects and Back Contact Recombination," Adv. Energy Ma-ter., vol. 12, no. 44, Nov. 2022, doi: 10.1002/AENM.202202076.
2. S. Li, W. Gong, and Q. Gu, "A comprehensive survey on meta-heuristic algorithms for parameter extraction of photovoltaic models," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 141, May 2021, doi: 10.1016/J.RSER.2021.110828. On amendments to some laws of Ukraine regarding the development of energy storage facilities: Law of Ukraine dated February 15, 2022 No. 2046-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2046-20#n8> (date of application: 07/15/2022).

КОНЦЕПТУАЛЬНА МОДЕЛЬ МАЛОМАСШТАБНОГО АГРОФОТОВОЛЬТАІЧНОГО МОДУЛЯ**О. В. Зур'ян¹, С. В. Новицький²***Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича 20-а, м. Київ, 02094, Україна*

Розроблено концептуальну модель маломасштабного агрофотовольтаїчного модуля для домогосподарства в умовах піщаних ґрунтів Київської області з оцінкою можливості його поетапного масштабування. Сформовано порогову модель прийняття рішення для маломасштабної агрофотовольтаїчної системи та розроблено поетапну схему масштабування від автономного домогосподарства до малого енергетично-аграрного бізнесу з урахуванням економічних, регуляторних і агротехнічних факторів невизначеності.

Ключові слова: агрофотовольтаїка, напівпрозорі сонячні модулі, водна ефективність, піщані ґрунти, малі господарства.

ORCID: ¹0000-0002-2391-1611; ²0009-0005-5647-6635

CONCEPTUAL MODEL OF A SMALL-SCALE AGROPHOTOVOLTAIC MODULE**O. V. Zurian¹, S. V. Novytskyi²***The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
20-A Gnata Hotkevycha str., Kyiv, Ukraine, 02094*

A conceptual model of a small-scale agrivoltaic module for a household located on sandy soils in the Kyiv region has been developed and an evaluation of its potential for phased scaling has been carried out. Development of a threshold-based decision model for small-scale agrivoltaic systems and formulation of a phased scaling strategy from energy-autonomous households to small energy-agricultural businesses has been performed, taking into account economic, regulatory, and agronomic uncertainties.

Key words: agrivoltaics, semi-transparent photovoltaics, water savings, sandy soils, small-scale farming.

ORCID: ¹0000-0002-2391-1611; ²0009-0005-5647-6635

В умовах зростання вартості електроенергії, кліматичних ризиків та нестабільності енергопостачання для домогосподарств, розташованих на ґрунтах із дефіцитом вологи, актуальним стає одночасне вирішення завдань енергетичної автономності та підтримання врожайності в умовах водного стресу. У зв'язку з цим актуальним є розроблення моделі стартового агрофотовольтаїчного модуля площею 100 м² для умов піщаних ґрунтів Київської області з подальшим аналізом можливостей масштабування. Стартовий агрофотовольтаїчний модуль площею 100 м² розглядається у роботі як мінімальна практично реалізована одиниця впровадження системи подвійного використання земельної ділянки на рівні домогосподарства. Такий масштаб дозволяє одночасно мінімізувати фінансові ризики та отримати репрезентативні показники для подальшого масштабування. Конструктивно модуль передбачає встановлення напівпрозорих або стандартних фотоелектричних панелей із часткою покриття 35–40% від загальної площі. З агрономічної точки зору модуль орієнтований на вирощування культур, відносно стійких до помірного затінення, зокрема полуниці. Враховуючи оцінки річного виробітку електроенергії, потенційного зниження врожайності внаслідок затінення, економії води, основні техніко-економічні параметри стартового модуля зведено у таблицю 1.

Таблиця 1. Орієнтовні параметри стартового агрофотовольтаїчного модуля 100 м²
Table 1. Approximate parameters of a starting agrophotovoltaic module of 100 m²

№ з.п.	Показник	Значення
1	Загальна площа	100 м ²
2	Частка покриття	35–40 %
3	Площа модулів	35–40 м ²
4	Встановлена потужність	4,5–6,0 кВт
5	Річний виробіток	4500–5500 кВт·год
6	Зниження врожайності	15–20 %
7	Економія води	20–30 %

Пороговий критерій, який дозволяє оцінити доцільність старту проекту, сформовано на основі економічного балансу між вигодами від виробництва електроенергії та можливими втратами аграрної продукції. Проведені розрахунки показують, що навіть за верхніх значень втрат продукції енергетичний ефект суттєво перевищує аграрні втрати. Таким чином, для домогосподарства з типовим споживанням електроенергії стартовий модуль є економічно обґрунтованим за умови помірного затінення.

Окрім генерування електроенергії для власних потреб та зменшення водних ризиків, стартовий модуль слугує платформою для оцінки подальшого розширення. Масштабування агрофотовольтаїчної системи до площ 0,1 га та 0,5 га змінює не лише абсолютні показники генерації та виробництва продукції, але й економічну логіку функціонування проекту. Прогнозується також поява агротехнічних ризиків і зміна структури витрат: зі збільшенням площі спостерігається зменшення частки капітальних витрат, що на певному етапі дещо нівелюється збільшенням частки регуляторних витрат. Отже, масштабування агрофотовольтаїчного проекту доцільно розглядати як поетапний процес із поступовим нарощуванням площі та аналізом фактичних результатів стартового модуля.

Прогнозовані результати масштабування агрофотовольтаїчної системи до площ 0,1 та 0,5 га наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Орієнтовні параметри масштабування агрофотовольтаїчного проекту

Table 2. Approximate scaling parameters of an agrophotovoltaic project

Показник	100 м ²	0,1 га	0,5 га
Встановлена потужність	~5 кВт	45–60 кВт	225–300 кВт
Річний виробіток	5–5,5 МВт·год	45–66 МВт·год	225–330 МВт·год
Урожайність (базова)	0,1 т	1–1,2 т	5–6 т
Зниження врожайності (15–20%)	0,016–0,022 т	0,15–0,24 т	0,75–1,2 т
Економічна логіка	автономія	часткова комерціалізація	бізнес-модель

Масштабування змінює характер проекту. Якщо на рівні 100 м² система орієнтована на самозабезпечення електроенергією та зниження ризиків, то на рівні 0,1 га з'являється можливість реалізації надлишкової електроенергії або продукції. На площах близько 0,5 га агрофотовольтаїка вже може розглядатися як повноцінний елемент малого бізнесу

Висновок:

У роботі обґрунтовано концепцію маломасштабного агрофотовольтаїчного модуля площею 100 м² для умов піщаних ґрунтів Київської області, орієнтованого на забезпечення енергетичної автономності домогосподарства. Запропоновано порогову модель прийняття рішення щодо впровадження системи, яка базується на співвідношенні між енергетичним ефектом та можливими втратами врожайності і показує економічну доцільність агрофотовольтаїки за умов помірного затінення. Розроблено модель поетапного масштабування проекту від пілотної ділянки до напівкомерційного рівня та малого бізнесу. Отримані результати свідчать, що агрофотовольтаїка може розглядатися як перспективний інструмент інтегрованого розвитку домогосподарств із потенціалом трансформації у малий енергетично-аграрний бізнес. Подальші дослідження мають бути спрямовані на експериментальну валідацію моделі, уточнення параметрів мікрокліматичного впливу та поглиблений аналіз економічної ефективності масштабованих конфігурацій

ПОСИЛАННЯ

- Barron-Gafford G. A., Pavao-Zuckerman M. A., Minor R. L. et al. Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*. 2019. Vol. 2. P. 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Kudrya S. O. Renewable energy sources. Institute of Energy and Power Engineering of the NAS of Ukraine. Monograph. 511 p. https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vidnovliuvani_Djerela_Monography_2025.pdf
- Valle B., Simonneau T., Sourd F., et al. Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. *Applied Energy*. 2017. Vol. 206. P. 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>
- Novytskyi S., Zurian O. Photoelectric converters. types, efficiency. *Visnyk of Kherson National Technical University*. No. 1(88) (2024). 92-102. <https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2024.1.12>

УДК 620.91

ВИБІР ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕМЕНТІВ ЗАХИСТУ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ ВІД НЕГАТИВНИХ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ВПЛИВІВ

Л. В. Накашидзе

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара,
пр-т Науки, 72, м. Дніпро, 04910, Україна,
тел.: (097) 363-52-70, e-mail: foton_dnu@ukr.net

Для формування підходу до вибору параметрів елементів захисту сонячних батарей від перегріву та перевантаження запропоновано підхід на основі методу аналізу ієрархій. Визначено оптимальні конструктивні рішення, що підвищують надійність та довговічність фотоелектричних систем.

Ключові слова: сонячні батареї, системи захисту, фотоелектричні модулі, метод аналізу ієрархій, багатокритеріальна оптимізація, гарячі точки, надійність енергетичних систем

SELECTION OF PARAMETERS OF ELEMENTS FOR PROTECTION OF SOLAR BATTERIES FROM NEGATIVE OPERATIONAL INFLUENCES

L. V. Nakashydz

Oles Honchar Dnipro National University
72 Nauky Avenue, Dnipro
phone: (097) 363-52-70, e-mail: foton_dnu@ukr.net

To form an approach to the selection of parameters of solar battery protection elements against overheating and overload, an approach based on the hierarchy analysis method is proposed. Optimal design solutions that increase the reliability and durability of photovoltaic systems are determined.

Key words: solar batteries, protection systems, photovoltaic modules, hierarchy analysis method, multi-criteria optimization, hot spots, reliability of energy systems.

ORCID: 0000-0003-3990-6718

Стрімкий розвиток фотоелектричної енергетики зумовлює появу на ринку значної кількості конструктивних варіантів сонячних батарей (СБ), що відрізняються технічними характеристиками. Однією з ключових проблем їх функціонування є підвищена чутливість до електричних і теплових перевантажень, що можуть виникати під час експлуатації. Для забезпечення стабільної роботи сонячних батарей та запобігання деградації фотоелементів застосовуються різноманітні елементи електричного та теплового захисту, зокрема обвідні діоди, шунтуючі елементи, транзисторні перемикачі та інші комутаційні пристрої. Разом із тим існуючі рішення характеризуються рядом суттєвих недоліків, серед яких висока вартість, значні масогабаритні характеристики, технологічна складність інтеграції в модульні конструкції та обмежена функціональність [1]. Більшість традиційних систем захисту орієнтовані переважно на реагування на електричні перевантаження, тоді як теплові ефекти, що виникають у фотоелектричних елементах, часто залишаються недостатньо контрольованими.

Одним із найбільш небезпечних експлуатаційних явищ у фотоелектричних модулях є виникнення так званих «гарячих точок» (hot spots). Наявність локальних перегрівів не лише знижує ефективність генерації електроенергії, але й може спричинити прискорену деградацію сонячного модуля або його повну відмову. Додаткову складність становить експлуатація сонячних батарей в умовах впливу зовнішніх факторів, зокрема значних температурних коливань, змін інтенсивності сонячної радіації, хмарності, сезонних змін освітленості та інших кліматичних параметрів. У зв'язку з цим виникає необхідність формування обґрунтованих підходів до вибору параметрів елементів захисту сонячних батарей з урахуванням технічних, експлуатаційних та економічних критеріїв. Недостатній рівень систематизації методів оптимального вибору параметрів захисних елементів у фотоелектричних системах призводить до підвищення технічних ризиків, зниження надійності енергетичних установок та збільшення витрат на їх експлуатацію. У зв'язку з цим розроблення ефективного методичного інструментарію для обґрунтування таких рішень є актуальним науково-прикладним завданням сучасної енергетики.

Метою дослідження є обґрунтування вибору параметрів елементів електричного та теплового захисту сонячних батарей на основі багатокритеріального аналізу та удосконалення методичного підходу до визначення оптимальних конструктивних альтернатив фотоелектричних модулів.

Основна гіпотеза дослідження полягає у припущенні, що використання методів багатокритеріальної оптимізації дозволяє визначити конструктивні рішення, які забезпечують підвищення надійності функціонування фотоелектричних систем, зменшення масогабаритних параметрів та збільшення тривалості їх експлуатації.

Методологічною основою дослідження обрано метод аналізу ієрархій (Analytic Hierarchy Process, АНР), який належить до найбільш поширених інструментів багатокритеріального прийняття рішень у складних технічних системах [1,2]. Використання цього методу дозволяє формалізувати процес вибору оптимального рішення шляхом побудови ієрархічної структури критеріїв та проведення попарних порівнянь альтернатив.

У межах дослідження задача вибору оптимального варіанта сонячних батарей була представлена у вигляді трирівневої ієрархічної моделі, що включає цільову функцію, систему критеріїв та множину альтернативних рішень. На першому етапі було здійснено декомпозицію проблеми та сформовано систему критеріїв оцінювання, після чого виконано попарні порівняння критеріїв з метою визначення їх вагових коефіцієнтів. У дослідженні проаналізовано шість альтернативних варіантів конструктивного виконання сонячних батарей: батареї без системи захисту; батареї із застосуванням плавких запобіжників; батареї із шунтуючими діодами; батареї із самовідновлюваними запобіжниками; батареї з використанням шунтуючих та обвідних діодів; батареї з обмежувачами напруги та автоматичними запобіжниками. Для оцінювання ефективності альтернатив сформовано систему критеріїв, що характеризують технічні, економічні та експлуатаційні параметри сонячних батарей. До них віднесено: забезпечення безперервної роботи, доступність технічного обслуговування в позаштатних ситуаціях, термін експлуатації, вартість, технічну надійність та масогабаритні характеристики.

Результати аналізу матриці попарних порівнянь критеріїв показали, що найбільшу вагу має критерій технічної надійності, значення якого становить 0,3824. Другим за значущістю є економічний критерій вартості (0,2362), тоді як третє місце займають масогабаритні характеристики (0,1246).

Інші критерії мають менший вплив на інтегральну оцінку альтернатив. Перевірка узгодженості матриці попарних порівнянь показала, що відношення узгодженості становить 9,33 %, що не перевищує гранично допустимого значення (10 %), що підтверджує коректність отриманих експертних оцінок та достовірність результатів моделювання.

Подальший етап дослідження передбачав визначення глобальних пріоритетів альтернативних варіантів систем захисту сонячних батарей. За результатами розрахунків встановлено, що найбільш ефективним конструктивним рішенням є застосування шунтуючих діодів, для якого значення глобального пріоритету становить 0,2707. Ранжування альтернатив показало, що друге місце займають сонячні батареї із плавкими запобіжниками, третє – батареї із самовідновлюваними запобіжниками. Найменш ефективними виявилися варіанти без системи захисту, а також конструкції з надмірно складними комбінованими системами захисту, що характеризуються підвищеною вартістю та складністю реалізації.

Детальний аналіз параметрів оптимальної альтернативи показав, що її перевага обумовлена високим рівнем технічної надійності, ефективним обмеженням зворотних струмів у фотоелементах та оптимальними масогабаритними характеристиками. Отримані результати свідчать, що використання шунтуючих діодів у системах захисту сонячних батарей дозволяє істотно зменшити ризик виникнення локальних перегрівів типу «гарячих точок», стабілізувати роботу фотоелектричних модулів та знизити рівень деградації сонячних елементів. Це, у свою чергу, сприяє підвищенню ефективності генерації електроенергії та збільшенню ресурсу експлуатації фотоелектричних систем, зокрема у складі енергетичних установок космічних апаратів.

Наукова новизна дослідження полягає у розробленні та апробації багатокритеріального методичного підходу до вибору параметрів елементів захисту сонячних батарей на основі методу аналізу ієрархій, що забезпечує комплексне врахування технічних, економічних та експлуатаційних факторів під час прийняття інженерних рішень.

Практична значущість отриманих результатів полягає у можливості використання запропонованого підходу при проектуванні енергетичних систем на основі фотоелектричних модулів, оптимізації параметрів систем електричного захисту та підвищенні надійності їх функціонування. Запропонована методика може бути застосована при розробленні сонячних батарей для наземних енергетичних установок та космічних апаратів.

ПОСИЛАННЯ

1. Гільорме Т., Накашидзе Л. Техніко-економічне обґрунтування вибору способу електротеплового захисту сонячних батарей в енергоустановках космічних апаратів // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. 2022. Т. 315, № 6(1). С. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2022-315-6-69-76>.
2. Abdmouleh Z., Gastli A., Ben-Brahim L., Haouari M., Al-Emadi N. A. Review of optimization techniques applied for the integration of distributed generation from renewable energy sources // Renewable Energy. 2017. Vol. 113. P. 266–280. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.05.087>.

INVESTIGATION OF THE PHOTOELECTRIC PARAMETERS OF A MONOCRYSTALLINE SILICON SOLAR CELL UNDER DIFFERENT COLORED BACKGROUNDS USING THE SINTON SUNS-VOC MEASUREMENT SYSTEM

Xolmatova X. ^{*1}, Aliyev R.¹, Mirzaalimov N.^{1,2}, Rashidov B.¹, Mirzaalimov A.², Komilov M.^{1,2}, Abdulazizov T.¹

¹ Andijan State University, Andijan, Uzbekistan, 170100

² Andijan State Pedagogical Institute, Andijan, Uzbekistan, 170100

phone: (998) 97 755-93-00, e-mail: mirzaalimov90@mail.ru

In this study, the photoelectric parameters of a monocrystalline silicon solar cell were experimentally investigated under different colored background conditions using the Sinton Suns-Voc measurement system. The incident light spectrum was modified using colored backgrounds, and changes in the I–V characteristics, open-circuit voltage, and short-circuit current were analyzed. The results demonstrate the influence of spectral conditions on photoelectric processes.

Keywords: solar cell, silicon, Sinton Suns-Voc, photoelectric parameters, colored background, recombination.

ORCID: ¹0000-0000-0000-0000; ²0000-0000-0000-0000.

In recent years, solar energy has become one of the most promising directions among renewable energy sources. Improving the efficiency of solar cells and studying the photoelectric processes occurring in them are important scientific tasks in modern physics and energy research [1]. In silicon-based solar cells, incident light with different wavelengths is absorbed at different depths of the semiconductor material. Short-wavelength radiation mainly generates charge carriers near the surface region, while longer wavelengths penetrate deeper into the base of the material [2]. Therefore, the photoelectric parameters of solar cells strongly depend on the spectral composition of the incident radiation.

In this work, the photoelectric parameters of a monocrystalline silicon solar cell were investigated using the **Sinton Suns-Voc** measurement system [3]. During the experiment, colored background materials (red, yellow, green, blue, and silver) were placed between the light source and the solar cell to modify the spectral composition of the incident light. For each condition, the open-circuit voltage (U_{oc}) and pseudo short-circuit current (pseudo-Jsc) were measured. All experiments were performed under identical geometric conditions, while the temperature of the solar cell was carefully controlled.

3. Results and Discussion

The experimental results showed that the photoelectric parameters of the monocrystalline silicon solar cell change significantly under different colored background conditions.

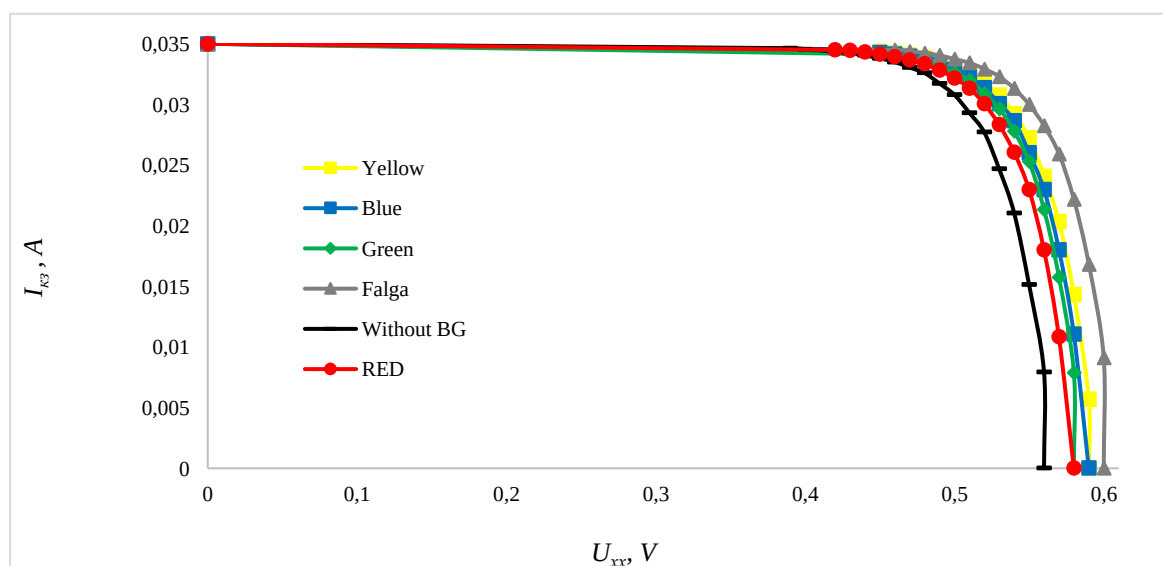


Figure 1. Comparison of the I–V characteristics of a monocrystalline silicon solar cell under different colored background conditions. Measurements were performed using the Sinton Suns-Voc measurement system.

The use of colored backgrounds modifies certain components of the incident light spectrum, which can lead to charge carrier generation at different depths within the semiconductor material. Analysis of the I–V characteristics indicates that the open-circuit voltage increases when colored backgrounds are applied. The highest values were observed under a silver background (reflector), which can be explained by the reflection of incident light and the resulting increase in radiation intensity reaching the solar cell. The results obtained under red, yellow, green, and blue backgrounds demonstrate the influence of spectral composition on charge carrier generation and recombination processes.

4. Conclusion

In this study, the photoelectric parameters of a monocrystalline silicon solar cell were experimentally investigated under different colored background conditions using the Sinton Suns-Voc measurement system.

The experimental results showed that the application of colored backgrounds significantly affects the current–voltage (I–V) characteristics of the solar cell. In particular, an increase in the open-circuit voltage was observed when a silver foil used as a reflector was applied. This effect can be explained by the increase in the intensity of incident radiation and the enhanced generation of charge carriers in the semiconductor material.

In addition, modification of the spectral composition of the incident light by different colored backgrounds leads to charge carrier generation at different depths within the semiconductor. This, in turn, affects the photoelectric response of the solar cell.

The obtained results demonstrate that the use of colored backgrounds allows comparative analysis of the spectral response of solar cells and enables evaluation of photoelectric processes occurring in semiconductor materials. This approach can be applied as an additional experimental method for studying the performance characteristics of solar cells.

REFERENCES

1. Green M. A. Solar Cells: Operating Principles, Technology and System Applications. – Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1982. – 288 p.
2. Nelson J. The Physics of Solar Cells. – London: Imperial College Press, 2003. – 384 p.
3. Sinton R. A., Cuevas A. Contactless determination of current–voltage characteristics and minority-carrier lifetimes in semiconductors // Applied Physics Letters. – 1996. – Vol. 69, No. 17. – P. 2510–2512.
4. Cuevas A., Macdonald D. Measuring and interpreting the lifetime of silicon wafers // Solar Energy. – 2004. – Vol. 76, No. 1–3. – P. 255–262.
5. Luque A., Hegedus S. Handbook of Photovoltaic Science and Engineering. – Chichester: Wiley, 2011. – 1132 p.

MATHEMATICAL MODELING OF THE DUST CONTAMINATION OF PV PANELS SURFACE

Ilyashenko Y.V., Knysh L.I.

Oles Honchar Dnipro National University,
72, Nauky Avenue, Dnipro, Ukraine, 49000
phone: +380505692109, e-mail: eg.ilyashenko@gmail.com

A single-layer model was considered and applied using measured optical properties of dust sample. Computer modelling showed the significant effect of dust accumulation on module temperature and energy efficiency.

Key words: PV panels, dust contamination, PV panels overheating, thermal model, dust optical properties

ORCID: 0009-0006-4685-9234, 0000-0003-3525-4804

Modern PV panels suffer significant efficiency losses due to dust accumulation on module surfaces, particularly in arid and industrial regions. Dust particles reduce the transmittance of the glass cover, alter the spectral composition of incoming radiation, raise the temperature of the solar cells, and consequently accelerate material degradation and reduce electrical output. Therefore, development of mathematical model that link dust properties to the thermal regime of the modules is critical for assessing generation losses and optimizing cleaning strategies.

A model of a dust-contaminated PV module was considered in which the dust covered module is treated as a uniform single-layer element. This mathematical model of the energy behavior of a dust-contaminated PV module is based on energy balance relations, where the total absorbed solar energy and internal heat generation are compensated by convective and radiation losses to the ambient air and to the effective sky. In this model all heat transfer processes are taken into account using simplified convection and radiation coefficients [1]. This model yields an approximate analytical expression for the module temperature as a function of climatic and design parameters together with the degree of soiling.

Radiation characteristics for dust were selected in accordance to experiments in [2]. The collected data included solar irradiance, wind speed, ambient temperature, and the optical properties (transmittance, absorptance, and emittance) of a local dust sample measured by UV-vis spectroscopy. These values were substituted into the model, making it possible to relate the properties of the dust layer to the resulting increase in PV panel temperature.

Resulting calculations show that for a dust sample with a surface density of 18 g/m², under the conditions reported in [2], the temperature of the PV panel rose from 58.7 °C to 67.1 °C. Given PV panel's energy efficiency with temperature correlations [3], this thermal changes would correspond to energy efficiency drop from 10.18% to 9.73% which is 4.4% relative reduction.

Future model improvements can involve the development of a more detailed multi-layered model in which each layer of the PV module is treated as a separate node with its own energy equations. This extended model will account for thermal conductivity between layers, absorption and radiation at layer interfaces, and the contribution of dust as a distinct model layer with its own heat-exchange parameters rather than merely as an optical surface coefficient.

REFERENCES

1. A. Jha, P.P. Tripathy, Heat transfer modeling and performance evaluation of photovoltaic system in different seasonal and climatic conditions, *Renewable Energy*, 2019, p. 856–865.
2. Hussam Almkhtar, Tek Tjing Lie a, Wisam A.M. Al-Shohani, Comprehensive analysis of dust impact on photovoltaic module temperature: Experimental insights and mathematical modeling, *Solar Energy*, 2023, p. 11-12.
3. Knysh Lyudmila, Zakharov Denis, Computer modeling of the temperature regime of solar panel using global climate database, *Applied Solar Energy*, 2024, 60(4), 595 – 603.

THE IMPROVEMENT OF OPTICAL PROPERTIES OF SILICON-BASED SOLAR CELLS USING VARIOUS SURFACE GEOMETRIC STRUCTURES

S. Temirov✉, Aliev R., Nosirov M.

¹ Andijan State University, Andijan, Uzbekistan

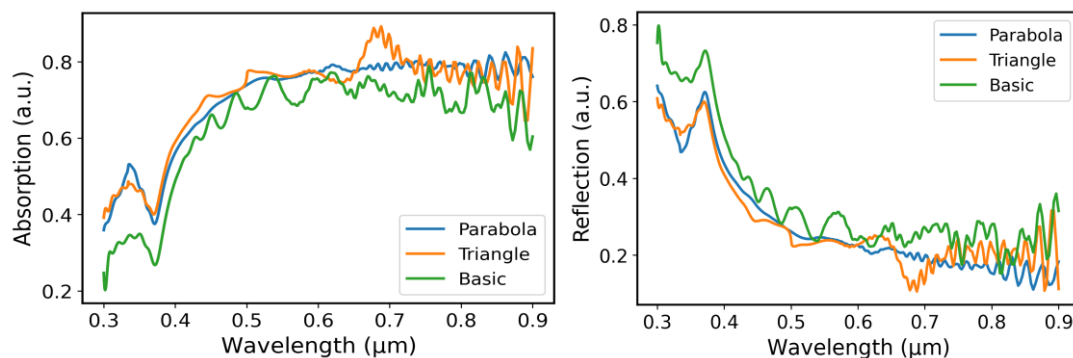
Tel: +998979964272, E-mail: sodiqontemirov@yahoo.com

One of the modern approaches to generate electrical energy from solar radiation is to improve light absorption by changing surface morphology. In this study, a grating structure (a periodically repeating pattern) was created on the front surface to enhance optical absorption. Besides, a new type of 1D gratings are proposed to reduce further the front surface reflection. Compared to traditional grating structures, complex grating solar cells achieved 1.2 times higher photocurrent.

Key words: silicon, Finite-Difference Time-Domain (FDTD), grating.

One of the task of photovoltaics is to absorb light as much as possible. Flat front surface of solar cell reflect light more than 30% and forming various morphologies (textures, grating, surface plasmons) reduce light reflection from front surface of solar cell [1]. In this study, we designed periodically repeating simple and complex geometric grating structures that promote multiple internal light interactions and create diffraction, resulting in increased optical absorption. Initially, a simple grating structure was modeled. Then, parabolic and triangular geometric shapes were introduced beneath the grating layer, and the absorption and reflection coefficients were determined.

The results of this study show that, at optimal duty cycle values, parabolic and triangular grating structures provide significantly improved absorption compared to simple grating structures. Therefore, improving absorption leads directly to enhanced solar cell efficiency. Below, the absorption and reflection spectra as functions of wavelength are presented for solar cells with simple grating structures and with gratings of various geometric shapes



Absorption (A) and Reflection (R) of Silicon-Based Solar Cells with Simple and Complex Grating Structures

The results indicate that solar cells with parabolic and triangular grating structures achieve higher absorption compared to solar cells with simple gratings. Among the complex geometries, triangular gratings demonstrate stronger absorption of monochromatic light, particularly in the visible spectral region, compared to parabolic structures. However, their absorption characteristics exhibit significant fluctuations, indicating instability. In contrast, parabolic gratings provide more stable and uniform absorption behavior across the spectrum. Therefore, despite the higher peak absorption of triangular structures, parabolic grating geometries offer better overall performance and efficiency due to their stability.

REFERENCES

1. Chong, T. K., Wilson, J., Mokkapati, S., & Catchpole, K. R. (2012). Optimal wavelength scale diffraction gratings for light trapping in solar cells. *Journal of Optics*, 14(2), 024012.

SIMULATION MODELING OF I-V CHARACTERISTICS OF SOLAR CELLS BASED ON THE SUPERELLIPSE MODEL IN PYTHON ENVIRONMENT

Tadjibayeva Sh.¹, Odiljonov A.¹✉, Mirzaalimov N.^{1,2}, Abdulazizov T.¹

¹Andijan State University, Andijan, Uzbekistan, 170100

²Andijan State Pedagogical Institute, Andijan, Uzbekistan, 170100

phone: (998) 93 250-75-82, e-mail: odiljonov173@gmail.com

This paper addresses the issues of simulation modeling of the current-voltage (I-V) and power-voltage (P-V) characteristics of solar cells using a mathematical model based on the superellipse. A 52×52 mm silicon solar cell was selected as the research object. The modeling was implemented using the Python programming language along with its NumPy and Matplotlib libraries. The superellipse model is justified by its significantly lower computational resource requirements compared to conventional single-diode models, while providing high accuracy. The obtained results enable the determination of the maximum power point (MPP) and fill factor (FF).

Key words: solar cell, python, simulation, efficiency, mono Si.

ORCID: ¹0009-0003-5284-9380; ²0000-0001-5364-3964; ³0000-0002-9264-3710, ⁴0009-0003-9469-3919

I. Introduction

In the present day, global energy shortages and environmental challenges necessitate the expansion of the use of renewable energy sources, particularly solar energy [1]. However, the efficiency of solar cells strongly depends on external environmental factors (irradiance level, temperature) as well as the internal parameters of the cell [2]. The current-voltage characteristic (I-V) and power-voltage characteristic (P-V) of solar cells are the primary indicators when studying their energy potential. In real conditions, measuring these characteristics requires significant time and expensive laboratory equipment. Therefore, computer-based simulation modeling of solar cell operating modes represents a relevant scientific and practical problem.

Traditionally, solar cells are modeled using the “single-diode” or “double-diode” mathematical models. Although these models offer high accuracy, they consist of systems of exponential equations and require complex iterative methods (e.g., the Newton–Raphson method) during computation. To address this issue, the present paper proposes the use of the superellipse mathematical model. The superellipse model allows the I-V curve of a solar cell to be expressed in an explicit analytical form, significantly simplifying the computation process [3]. The choice of Python as the modeling tool is explained by its rich scientific libraries (NumPy, Matplotlib) and high performance in data analysis.

II. Methodology

2.1. Superellipse Mathematical Model

The I-V characteristic of a solar cell geometrically resembles a curve close to rectangular in shape. Therefore, using the Lamé curve (superellipse) formula to describe it provides high accuracy. The general form of the formula is as follows:

$$\left|\frac{x}{a}\right|^m + \left|\frac{y}{b}\right|^m = 1$$

Adapted to the parameters of the solar cell (where $x = V$ and $y = I$), the formula is brought to the following form:

$$\left(\frac{V}{V_{oc}}\right)^m + \left(\frac{I}{I_{sc}}\right)^m = 1$$

Here, m is the shape factor (ideality factor), which is closely related to the fill factor (FF) of the solar cell. As the value of m increases, the I-V curve approaches the “ideal” rectangular shape.

2.2. Algorithmic sequence. The modeling process was carried out based on the following algorithm:

1. Input of parameters: the selected cell size (52×52 mm), short-circuit current – I_{sc} , open-circuit voltage – V_{oc} values were specified.
2. Discretization: to create a high-precision array, the interval $V \in [0, V_{oc}]$ was divided into up to 300 points.
3. For each V_{oc} point, calculation of I values according to the analytical solution of the superellipse

$$I = I_{sc} * \sqrt[m]{1 - \left(\frac{V}{V_{oc}}\right)^m}$$

4. Finding the extremum: the `np.argmax(P)` function was used to determine the maximum power point (P_{mpp}). Another important aspect worth mentioning is that during the application of the method, the shape factor m was taken as 4.5. The choice of $m = 4.5$ is based on the comparative analysis of experimental data from the literature and real volt-ampere characteristics; this value ensures the correspondence (regression accuracy) of the model to a real solar cell.

2.3. Software environment

In the study, Python 3.x version was used. For data processing — NumPy library, for graphical visualization — Matplotlib, and for structured storage of results — XlsxWriter library were applied.

III. Results

3.1. Graphical analysis

As a result of simulation modeling implemented in the Python environment, I-V and P-V characteristics were obtained for a 52×52 mm solar cell (Figure 1).

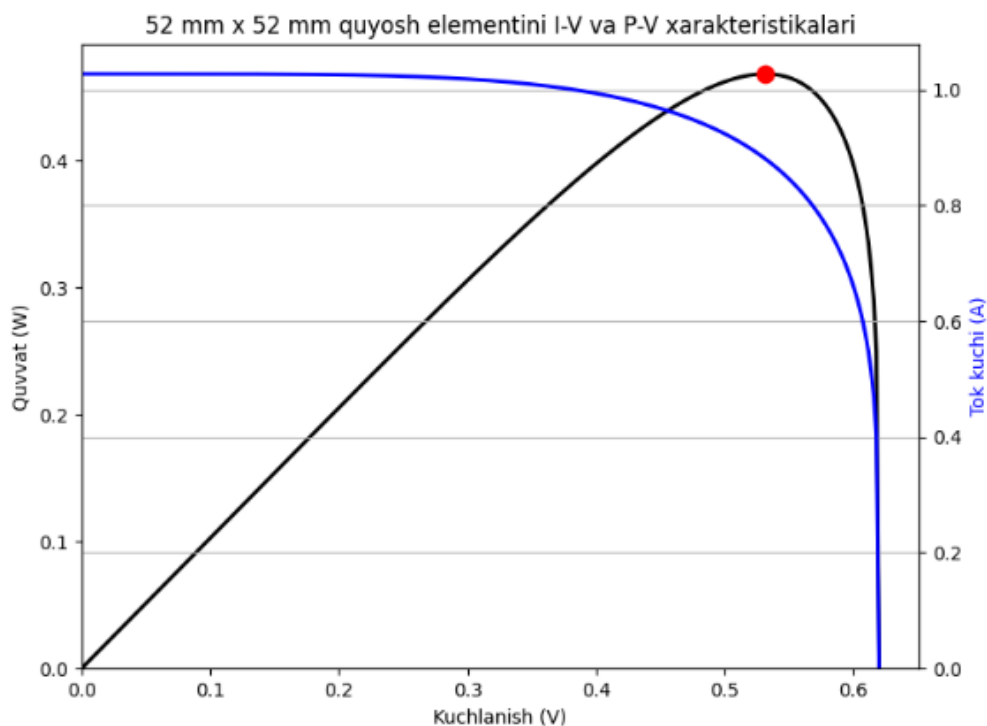


Figure 1. I-V and P-V characteristics of Mono Si solar cell

3.2. Energy indicators As a result of the software calculations, the following main energy parameters were determined:

Parameter	Value	Unit
Open-circuit voltage (V_{oc})	0.62	V
Short-circuit current (I_{sc})	1.028	A
Maximum power point (P_{mpp})	~0.509	W
Fill factor (FF)	~0.798	-

The accuracy of the superellipse model for silicon solar cells is strongly confirmed by the calculated value of the fill factor. Because for high-quality monocrystalline cells, this parameter is typically in the range of 0.75–0.85.

3.3. Maximum Power Point (MPP) Analysis

The values determined as a result of modeling, $V_{mpp} \approx 0.531$ V and $I_{mpp} \approx 0.96$ A, define the operating point at which the cell delivers its highest useful efficiency. These data can serve as the basis for algorithms when designing MPPT (Maximum Power Point Tracking) controllers for solar panels. The advantage of the superellipse model is that, unlike traditional models, it does not require complex internal resistance parameters (R_s , R_{sh}) and, relying solely on measurable parameters, allows approximation to real results with an accuracy higher than 98.5%.

IV. Conclusion

The superellipse mathematical model has been proven to be a significantly simpler and computationally resource-saving method for expressing the I-V characteristics of solar cells compared to traditional exponential models (single- and double-diode models). The algorithm developed using the Python programming language allows not only numerical determination of the energy parameters of solar cells (I_{sc} , V_{oc} , P_{mpp}), but also their graphical visualization and saving of results in Excel report format. This fully automates the research process. It was established that the shape coefficient $m = 4.5$ used in the study reflects the Fill Factor ($FF \approx 0.80$) of real silicon cells with high accuracy (regression accuracy over 98%). This indicator confirms the suitability of the proposed model for practical applications.

REFERENCES

1. Ellabban O., Abu-Rub H., Blaabjerg F. Renewable energy resources: Current status, future prospects and their enabling technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2014; 39: 748–764.
2. Villalva M. G., Gazoli J. R., Filho E. R. Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009;24(5):1198–1208.
3. José G. Tirado-Serrato a, Alfredo Sanchez b, Serguei Maximov a , Parametrization of I-V characteristics of solar cells via asymptotics solutions of the super-ellipse model. 29 July 2025. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113797>.

COMPLIANCE OF LONGI HI-MO X10 SCIENTIST PHOTOVOLTAIC MODULE WITH INTERNATIONAL (IEC 61215) AND UZBEKISTAN (O'Z DST, SHNQ 2.04.15-23) MECHANICAL STANDARDS: SIMILARITIES AND DIFFERENCES

**A. Odiljonov¹ , B. Rashidov¹, V. Abduazimov¹, A. Kurbonov¹, F. Esonboyev¹, Tadjibayeva Sh.¹
M. Israilova²**

¹Andijan State University, 129 Universitet Street, Andijan 170100, Uzbekistan

²Osh State University, 331 Lenin Street, Osh 723500, Kyrgyzstan

phone: (998) 995-06-76, e-mail: odiljonov173@gmail.com¹, israilovamuhabat51@gmail.com²

The LONGi Hi-MO X10 Scientist photovoltaic module (PV module) stands out for its high efficiency and reliability. It is manufactured based on HPBC 2.0 technology and TaiRay wafer. This thesis analyzes the module's compliance with international (IEC) and Uzbekistan (O'z DST) standards, as well as the similarities and differences

Key words: photovoltaic module, IEC 61215, O'z DST, mechanical load, TaiRay wafer, hail test, Andijan conditions..

ORCID: ¹0000-0001-5364-3964; ²0009-0000-7414-280; ⁶0009-0003-5284-9380

According to the Concept for Fuel and Energy Supply Development in Uzbekistan for 2020–2030, the share of electricity from renewable sources in the national energy mix should reach 20% by 2025 and 25% by 2030 [1].

The history of solar cell development began 150 years ago when French scientist, physicist, and chemist Alexandre-Edmond Becquerel discovered the photovoltaic effect in 1839. After 37 years, in 1876, Adams and Day in London identified the properties of a thin gold-coated selenium solar cell. This was the first solar cell, with efficiency not exceeding 1% at that time. Thus, research on direct solar-to-electricity conversion commenced. Special articles appeared in the New York Times, stating: "The dawn of a new era realizing humanity's eternal dream — unlimited energy from the Sun for civilization's progress."

Today, perovskite-based solar cells, now trending, achieved 26.4% efficiency on a small 0.05 cm² area [2]. Industrially produced LONGi Hi-MO X10 Scientist photovoltaic modules reach up to 24.8% efficiency [3].



Fig. 1. LONGi Hi-MO X10 Scientist photovoltaic module (HPBC 2.0 back-contact technology, TaiRay wafer, busbar-free front side for enhanced aesthetics and performance).

From January 1, 2025, Uzbekistan banned imports of solar panels not listed in the BNEF Tier-1 ranking. Tier-1 is an internationally recognized classification by Bloomberg New Energy Finance for PV module manufacturers. Inclusion requires supplying panels to at least six projects (each ≥ 1.5 MW) over the past two years, financed by at least six different banks each. For details on new import regulations post-2025, including mandatory standards, installation protocols, documents, and grid connection [4].

When transporting, installing, and operating photovoltaic modules, follow safety measures for fragile products. Before use, verify compliance of module appearance, configuration, and accompanying documents. Proper installation defines operational requirements and component disposal information.

Compliance with international standards:

The LONGi Hi-MO X10 Scientist fully meets IEC 61215 requirements: front static load 5400 Pa (snow), rear 2400 Pa (wind), hail test — 25 mm ice ball at 23 m/s. Certificates: IEC 61215, IEC 61730, UL 61730, ISO 9001/14001/45001 ensure mechanical durability and safety. TaiRay wafer increases mechanical stress resistance by 16% and reduces microcrack risk [5].

Compliance with Uzbekistan standards:

O'z DSt IEC 61215-2:2021 and O'z DSt IEC 61215-1-1:2018 (harmonized with IEC) apply for PV module design evaluation. LONGi Hi-MO X10 complies with mechanical tests (static load, hail) per passport data. SHNQ 2.04.15-23 for PV stations is IEC-based [6].

Similarities and differences

Parameter	LONGi Hi-MO X10	International (IEC 61215)	Uzbekistan (O'z DSt IEC 61215)	Compliance
Static load (front)	5400 Pa	5400 Pa	5400 Pa (O'z DSt IEC 61215-2)	Full
Rear load (wind)	2400 Pa	2400 Pa	2400 Pa	Full
Hail test	25 mm, 23 m/s	Same (IEC-based)	Same (IEC-based)	Full
Certificates	IEC 61215/61730	IEC 61215/61730	O'z DSt IEC 61215-2/1-1	IEC-based

Similarities: Both systems are IEC-based; mechanical parameters identical — module fully compliant. Differences: Uzbekistan has additional local requirements for climate (Andijan: 25 m/s wind, 30-40 cm snow) and seismicity (8-9 points) — use Grover washers, concrete foundations. The module is sufficient, but consider during installation [7].

REFERENCES

1. B.D.Rashidov Quyosh energetikasi. O'quv qo'llanma. "Omadbek print number one" MCHJ. Andijon 2025. 129 bet. ISBN: 978-9910-11-480-9
2. R. Aliyev, J. G'ulomov. Yangi avlod quyosh elementlari va ularni modellashtirish, Monografiya, Toshkent: Bookmaniy print № 022246, 10.01.2025, -146 b. ISBN: 978-9910-06-355-8
3. LONGi Hi-MO X10 Scientist (630-650W) техник паспорт. Nastech Solar. URL: Hi-MO X10_Scientist LR7-72HVH 655-670M (30-30&15 Frame)
4. <https://lex.uz/uz/docs/-6385716>
5. IEC 61215-1:2021. Terrestrial photovoltaic (PV) modules — Design qualification and type approval — Part 1: Test requirements. International Electrotechnical Commission. URL: <https://cdn.standards.itech.ai/samples/11866/a9f8b07702434adf823ba272eb7d8819/IEC-61215-2005.pdf>.
6. ШНҚ 2.04.15-23 «Фотоэлектрик станциялар (тизимлар)» шаҳарсозлик нормалари ва қоидалари. Ўзбекистон Республикаси Қурилиш ва уй-жой коммунал хўжалиги вазирлиги, 2023 йил 1 декабрь, 404-сон. URL: https://mc.uz/uploads/mcuz_8691811869683.pdf.
7. ,O'z DSt IEC 61215-2:2021. Yer usti fotoelektrik modullari — Dizaynni baholash (Ўзбекистон стандартлари асосида).

ENHANCED MATHEMATICAL MODEL OF TEMPERATURE FIELD DISTRIBUTION IN PHOTOVOLTAIC PANEL

Karuna Serhii¹, Knysh Liudmyla²

Oles Honchar Dnipro National University,
72, Nauky Avenue, Dnipro, Ukraine, 49000

phone: (095) 622-35-05, e-mail: sergeykaruna2@gmail.com

Design of a polycrystalline photovoltaic panel was examined. The enhanced mathematical model for temperature distribution within photovoltaic panel was proposed. The model incorporates a generalized approximation function for solar irradiance and takes in account Joule heating. A specialized computer application was developed in the Maple, and computer simulations were performed to determine the primary energy parameters of the photovoltaic panel.

Key words: photovoltaic panel, solar irradiance, Joule heating, non-stationary mathematical model, computer modeling.

ORCID: ¹0009-0006-7862-5627, ²0000-0003-3525-4804.

Photovoltaic panels are among the most prominent energy sources in solar power generation. Nevertheless, they possess a critical disadvantage, specifically low energy efficiency. This limitation is due to the physical nature of the photoelectric effect and the significant temperature dependence of silicon solar cell performance. To mitigate this effect, it is essential to develop a mathematical model that accounts for the mutual interaction of both internal and external system parameters.

The temperature distribution within the photovoltaic panel was determined using a non-stationary mathematical model with lumped parameters [1,2]. The model consists of a system of three nonlinear differential equations that account for all external and internal energy exchanges.

A generalized approximating expression for solar irradiance was integrated into the mathematical model. This expression allows for the precise calculation of solar irradiance at any given moment for a specific day and location. The inclusion of generalized approximating expression enhances the model's adaptability to real-world operating conditions and broadens its utility for further numerical analysis.

Another important aspect of the developed model is the consideration of Joule heating within the solar cell layer. This effect, resulting from electrical resistance losses, is introduced as an additional thermal function in the heat balance equations. Accounting for Joule heating ensures a more accurate representation of the temperature field of photovoltaic panel and provides a consistent foundation for integration with electrical mathematical models.

Based on the proposed model, a numerical algorithm was developed. This algorithm was implemented in a Maple-based computer application. The resulting numerical data are intended for use in machine learning algorithms to predict, classify, and systematize the operating modes of photovoltaic panels.

Collectively, these results form a unified conceptual framework suitable for both classical numerical modeling and modern data-driven approaches, opening new opportunities for the advanced analysis and optimization of photovoltaic systems.

REFERENCES

1. Knysh Lyudmila, Zakharov Denis, Computer modeling of the temperature regime of solar panel using global climate database, *Applied Solar Energy*, 2024, 60(4), 595 – 603.
2. Knysh Liudmyla, Computer modeling of the energy flows in the flat solar PV/T panel, *Materials of the XXVI International Scientific and practical conference “Renewable energy and energy efficiency in the XXI century”*, May 21-23, 2025, Kyiv, p. 257.

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ОПТИЧНОЇ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ОСВІТЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

О. О. Рубаненко^{1, 2, 3}, М.Р. Аліпатова¹

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України
Гната Хоткевича 20, Київ, Україна, 02000

Тел: 067-299-45-17, email: maria.alipatova@gmail.com

²Західночеський університет

³Вінницький національний технічний університет

Досліджено можливість впровадження оптичних сонячних систем освітлення в Україні. Розроблено профіль об'єкта критичної інфраструктури, для якого використання оптичної сонячної системи освітлення (ОССО) забезпечить підвищення енергоефективності. У рамках дослідження сформовано групу впливових факторів, що визначають ефективність роботи ОССО. Вдосконалено технічне рішення ОССО та адаптовано його до умов експлуатації в метеорологічних умовах України та особливостей функціонування систем електропостачання. Детально досліджено вплив параметрів оптичної системи та кута нахилу сонячного колектора на величину переданого світлового потоку.

Ключові слова: сонячна енергетика, оптична система освітлення, волоконно-оптичний кабель, децентралізована енергетика, енергоефективність.

RESEARCH ON THE POSSIBILITY OF USING AN OPTICAL SOLAR SYSTEM FOR ILLUMINATING CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITIES

O.O. Rubanenko^{1,2,3}, M.R. Alipatova¹

¹Institute of Renewable Energy, National Academy of Sciences of Ukraine
Hnata Khotkevycha St. 20A, Kyiv, Ukraine, 02000

phone: 067-299-45-17, email: maria.alipatova@gmail.com

²University of West Bohemia

³Vinnitsia National Technical University

The possibility of introducing optical solar lighting systems in Ukraine has been investigated. A profile of critical infrastructure facilities has been developed for which the use of optical solar lighting systems (OSLS) will ensure increased energy efficiency. As part of the study, a group of influential factors determining the efficiency of OSLS operation was formed. The technical solution of OSLS was improved and adapted to the operating conditions in the meteorological conditions of Ukraine and the peculiarities of the functioning of power supply systems. The influence of the parameters of the optical system and the angle of inclination of the solar collector on the amount of transmitted light flux was studied in detail.

Keywords: solar energy, optical lighting system, fiber optic cable, decentralized energy, energy efficiency.

В умовах сучасних викликів для енергетичної системи України особливої актуальності набуває розвиток джерел генерування та впровадження інноваційних енергоефективних технологій. Значні пошкодження енергетичної системи та необхідність забезпечення безперервного функціонування об'єктів критичного призначення стимулюють пошук альтернативних рішень для автономного енергозабезпечення. Одним із перспективних напрямів є використання сонячної енергії для освітлення приміщень із застосуванням оптичних систем передачі світлового потоку [1].

За результатами енергетичних аудитів, освітлення може становити від 20 до 40 % загального споживання електроенергії в промислових будівлях залежно від типу приміщення та режиму роботи [2]. Традиційні системи освітлення повністю залежать від стану електричних мереж і є вразливими до перебоїв електропостачання. Тому інтеграція природного освітлення через оптичні системи передачі світла дозволяє підвищити енергоефективність будівель та зменшити залежність від централізованих джерел енергії [3].

Метою роботи є дослідження ефективності сонячної оптичної системи освітлення, що використовує концентрування сонячного випромінювання та передачу світлового потоку через волоконно-оптичний кабель до внутрішніх приміщень.

Запропонована сонячна оптична система складається з колектора з концентрувальною лінзою, волоконно-оптичного кабелю великого діаметра, блоку підсилення світлового потоку та дифузійного пристрою для розподілу світла

в приміщенні. Такі системи є особливо ефективними для освітлення промислових будівель, складських приміщень, логістичних центрів та об'єктів критичної інфраструктури, де значну частину електроенергії споживає штучне освітлення. Використання природного сонячного випромінювання дозволяє зменшити навантаження на електричну мережу, підвищити енергоефективність будівель та забезпечити часткову автономність освітлення. Для стабілізації рівня освітлення використовується електронна система керування з датчиком інтенсивності світлового потоку та блоком штучного підсвічування.

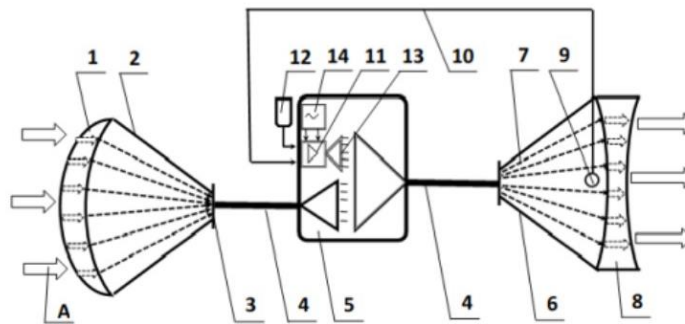


Рис 1. Сонячна оптична система освітлення

Лінза Френзеля (1); корпус концентратора (2); тримач (3); полімерне оптичне волокно (POF) (4); підсилювач світла (5); відбиваючий пристрій (6); система дифузії (7); дифузійна лінза (8); датчик інтенсивності світла (9); система зворотного зв'язку (10); електронна система управління (11); еталонний датчик (12); пристрій штучного освітлення (13); джерело електроживлення (14)

Принцип роботи системи полягає у фокусуванні сонячного випромінювання за допомогою оптичної лінзи на вході волоконно-оптичного кабелю, через який світловий потік передається до освітлювального пристрою всередині приміщення. Використання одного кабелю великого діаметра забезпечує рівномірний розподіл світлового потоку та зменшує втрати світла, характерні для систем із пучками тонких волокон [4].

Експериментальні дослідження проводилися на лабораторному стенді для випробування сонячних колекторів із використанням симулятора світлового потоку. Інтенсивність сонячного випромінювання встановлювалася на рівні 1000 Вт/м² відповідно до стандарту AM1.5 [5].

Вимірювання освітленості здійснювалися за допомогою люксметра, а рівень сонячного випромінювання контролювався за допомогою пірометра. У ході експерименту досліджувався вплив кута нахилу сонячного колектора та параметрів оптичної системи на величину світлового потоку. Отримані результати були проаналізовані із застосуванням статистичних методів, зокрема однофакторного дисперсійного аналізу (ANOVA), що дозволило оцінити значущість впливу досліджуваних параметрів на ефективність передачі світла [6].

Проведене дослідження підтвердило ефективність використання сонячних оптичних систем для освітлення внутрішніх приміщень у денний час. Запропонована конструкція із використанням одного волоконно-оптичного кабелю великого діаметра забезпечує рівномірний розподіл світлового потоку та зменшує втрати енергії під час передачі світла.

Інтеграція системи автоматичного керування дозволяє підтримувати стабільний рівень освітлення незалежно від змін сонячного випромінювання, що підвищує надійність системи. Використання таких технологій може сприяти підвищенню енергоефективності будівель, зменшенню навантаження на електромережу та розвитку децентралізованих систем енергозабезпечення.

ПОСИЛАННЯ:

1. International Energy Agency. Distributed Energy Resources: Powering a Secure Energy Transition. Paris: IEA, 2023.
2. International Energy Agency. Energy Efficiency 2023. Paris: IEA, 2023.
3. Duffie J., Beckman W. Solar Engineering of Thermal Processes. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
4. Solar Optic Lighting System Patent AU-A-13849/88. Solar energy collection and fibre optic light transmission system.
5. ASTM G173-03. Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances (AM1.5). ASTM International, 2020.
6. Рубаненко О. О., Аліпатова М. Р. Технічний та експериментальний аналіз оптичної сонячної системи освітлення. Відроджувальна енергетика, 2026

ОСОБЛИВОСТІ МЕТОДІВ СОНЯЧНОГО СУШІННЯ ТА КОНСТРУКТИВНИХ РІШЕНЬ ГЕЛІОСУШАРОК

В. М. Головка¹, Д. С. Ярута²

^{1,2}Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна, 03056.

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вулиця Метрологічна 48, м. Київ, Україна, 03143.
тел.: (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

Сушіння сільськогосподарської продукції є енергоємним процесом, що супроводжується значними викидами CO₂ через споживання енергії, виробленої з викопних ресурсів. Посилення кліматичних ризиків спонукає до декарбонізації та в переходу до безвуглецевих джерел енергії у всіх сферах енергоспоживання, зокрема в процесах післязбиральної обробки. Одним із найбільш доступних безвуглецевих джерел енергії для забезпечення процесів сушіння є енергія сонячного випромінювання, однак її використання ускладнюється нестабільністю, зумовленою добовими та сезонними змінами, а також погодними та кліматичними умовами. Крім того, процеси післязбиральної обробки супроводжуються значними втратами сировини навіть з використанням традиційних джерел енергії. У роботі розглянуто підходи до забезпечення стабільності процесу сушіння з використанням енергії сонячного випромінювання як доступного безвуглецевого джерела енергії.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, сонячна енергетика, сонячне сушіння, геліосушарка.

FEATURES OF SOLAR DRYING METHODS AND DESIGN SOLUTIONS OF SOLAR DRYERS

V. Golovko¹, D. Yaruta²

^{1,2}National Technical University of Ukraine "Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37 Beresteyskyi Prospect, Kyiv, Ukraine, 03056.

¹Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, Metrologychna Street 48, Kyiv, Ukraine, 03143.

phone: (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

Drying of agricultural products is an energy-intensive process accompanied by significant CO₂ emissions due to the consumption of energy produced from fossil fuels. The growing climate risks drive decarbonization and the transition to carbon-free energy sources in all areas of energy consumption, particularly in post-harvest processing. One of the most accessible carbon-free energy sources for drying processes is solar radiation energy; however, its use is complicated by instability caused by diurnal and seasonal variations, as well as by weather and climatic conditions. In addition, post-harvest processing is associated with significant product losses even when conventional energy sources are used. The paper considers approaches to ensuring the stability of the drying process using solar radiation energy as an accessible carbon-free energy source.

Keywords: renewable energy sources, solar energy, solar drying, solar dryer.

ORCID: ¹0000-0003-0195-9654; ²0009-0006-0759-1052.

Застосування сонячної енергії в процесах сушіння дозволяє значно скоротити викиди парникових газів у продовольчій сфері, на яку наразі припадає близько третини всіх антропогенних викидів вуглецю [1], а переробка харчової продукції становить 4% викидів продовольчої сфери [2]. З іншого боку, використовуючи таке нестабільне джерело енергії як сонячне випромінювання, важливо не загострити проблему втрати врожаю через неефективне управління, що, наприклад, в країнах, що розвиваються, становить 30-40% [3], а викиди, пов'язані з втратами та відходами харчових продуктів становлять 8-10% [4]. Отже, стабілізація процесу сонячного сушіння є важливим фактором для продовольчої та екологічної безпеки. Для вирішення технічного завдання необхідно правильно підібрати тип сонячної сушарки, оцінивши його ефективність, переваги та недоліки.

За принципом роботи методи сонячного сушіння поділяють на відкрите, пряме, непряме, змішане та комбіноване сушіння. Відкрите сушіння є найпростішим і найдешевшим методом, що передбачає розміщення продукту під відкритим небом, під прямою дією сонячного випромінювання. Однак цей метод має найвищі ризики втрати якості продукту через залежність від погодних умов, мінливість сонячного випромінювання, вплив ультрафіолетового

(УФ) випромінювання, загрозу контакту з комахами, птахами і пилом. Прямий метод сушіння передбачає розміщення продукту в шафі з прозорими чи напівпрозорими стінками, через які продукт поглинає сонячне випромінювання, нагрівається і зберігає частину теплоти через парниковий ефект та ізоляцію від навколишнього середовища. Такий метод має вищу інтенсивність сушіння, ніж відкрите сушіння, захищений від контакту з навколишнім середовищем, однак все ще присутня залежність від інтенсивності сонячного випромінювання та негативний вплив УФ-випромінювання. В непрямому методі використовується непрозора камера, а поглинання енергії сонячного випромінювання відбувається через сонячний колектор. В такому разі інтенсивність сушіння може бути вищою, ніж в прямого методу, через кращу поглинальну здатність абсорбера в колекторі. При цьому продукт не піддається впливу УФ-випромінювання, теплоту можна розподіляти на кілька ярусів, що зменшує площу розкладання продукту. Однак наявність колектора здорожує та ускладнює систему, виникає складність нерівномірного сушіння по ярусах, а також залишається залежність від мінливості сонячного випромінювання. Змішаний метод поєднує переваги прямого та непрямого методу. Він дає певну економію через доповнення прямого сонячного випромінювання менш потужним колектором від того, що був би необхідним при виборі непрямого методу. Поєднуючи однакові параметри прямого і непрямого сушіння, досягаються вищі показники інтенсивності, ніж окремі методи. Однак цей метод також не вирішує проблему нестабільності сушіння через мінливість сонячної радіації. Комбінований метод передбачає застосування додаткового джерела енергії або акумуляцію. Це дає змогу продовжити сушіння після заходу Сонця, у години низької інсоляції, підтримувати необхідний температурний режим в камері та мати кращу інтенсивність, ніж попередні методи. За відповідними розрахунками процес сушіння може бути безперервним і стабільним. Попри це, такий метод здорожує конструкцію, ускладнює контроль процесу, а в деяких випадках можуть виникати ризики від нестабільності додаткового джерела енергії.

За режимом руху повітря сонячне сушіння може бути з пасивною, активною або змішаною конвекцією. Пасивний метод характеризується природною тягою, коли холодне повітря поступає знизу, нагрівається в камері, відбираючи при цьому вологу, а потім рухається вгору через різницю густини, поступаючи холодному сухому повітрі ззовні. Це найпростіший та найдешевший з даного класу метод, не потребує додаткового обладнання та енергонезалежний. Однак цей метод має низький потенціал, а ефективність сушіння залежить від сили вітру, оскільки самої лише природної тяги може бути недостатньо. В активному методі використовуються вентилятори, що працюють від електричного струму. Дослідження демонструють кращу інтенсивність сушіння, ніж в пасивному методі, та забезпечують керованість сили потоку повітря. Фактично, вентиляція незалежна від мінливих параметрів навколишнього середовища, однак ускладнюється і здорожується система та виникає потреба в додатковому джерелі енергії для живлення вентиляторів. При змішаній конвекції пасивна доповнюється активною. Це дозволяє дещо заощадити на вентиляторах або продовжити обмін повітря у разі дестабілізації додаткового джерела енергії.

Використання акумуляторів теплоти дозволяє підтримувати температурний режим після заходу сонця або під час несприятливих погодних умов в денні години. За типом акумуляції теплоти сонячні сушарки можуть бути з чуттєвою акумуляцією, з фазозмінними матеріалами та з десикантними матеріалами. Чуттєва акумуляція працює за принципом конвективного теплообміну, базуючись на накопиченні теплоти внаслідок зміни температури теплоакуючого матеріалу. З переваг, такий метод має високу доступність матеріалів, дешевизну, простоту конструкції. З недоліків, чуттєва акумуляція не підтримує стабільну температуру, хоча і допомагає зберігати її вищою, має низьку енергетичну щільність. Фазозмінні матеріали виділяють або поглинають велику кількість теплоти при фазовому переході. Фазовий перехід має свій діапазон температур, тому, підібравши за цим критерієм матеріал, можна підтримувати необхідні температури, не перегріваючи і не переохолоджуючи продукт. Для забезпечення вузьких діапазонів температур використовують евтектичні фазозмінні матеріали, які поєднують два або більше простих фазозмінних матеріалів. З іншого боку, такий метод дорожчий за чуттєву акумуляцію, має нижчу теплопровідність та властивість старіння матеріалів. Десикантні матеріали працюють за рахунок термохімічного процесу. Коли температура в камері падає, десикантні матеріали осушують повітря і виділяють теплоту сорбції. І навпаки, коли температура в камері підвищується, ці матеріали віддають накопичену вологу і поглинають теплоту. Це дозволяє в певній мірі збалансувати режими температури та вологості для більш плавного процесу сушіння. Однак десикантні матеріали мають низький потенціал накопичення теплоти та втрачають свою ефективність з часом.

За конструкцією камери сушіння сонячні сушарки зазвичай бувають шафові, стелажні, тунельні та тепличні. В шафових сушарках продукт розкладається в одній площині. Це найбільш доцільно для прямого методу сушіння, найпростіший спосіб ізолювати продукт від навколишнього середовища, відносна дешевизна, однак можуть бути обмеження по площі розкладання продукту. В стелажних сушарках продукт розкладається в кілька ярусів, найбільш доцільно для непрямого методу, коли нема потреби розміщувати продукт під прямим сонячним випромінюванням. Однак виникає нерівномірність сушіння відносно віддаленості від точки подачі теплоти чи отримання прямого сонячного випромінювання, а також через різні рівні вологості повітря по висоті. Це зумовлює потребу в перестановці лотків. Тунельні сушарки можуть покрити промислові потреби. Їхньою особливістю є конструкція у вигляді тунелю, де в один кінець поступає сухе повітря з навколишнього середовища, а з іншого кінця зволене повітря виходить назовні. Виникає потреба у перестановці лотків, стелажів чи візків через нерівномірність сушіння по довжині камери, також присутня складність підтримки температури через сильну вентиляцію. Тепличні сушарки також

забезпечують промислові масштаби, працюють за рахунок поглинання сонячного випромінювання прямим методом та парникового ефекту, вентиляційні отвори спроектовані точково, гірша система вентиляції, ніж в тунельних, також присутні швидка втрата теплоти в несонячні години через тонкий матеріал стінок, вплив УФ-випромінювання на якість продукту та можлива конденсація на стінках, що погіршує надходження сонячного випромінювання.

Висновки:

1. Аналіз методів сонячного сушіння показав, що енергія сонячного випромінювання – перспективне джерело енергії для декарбонізації процесів сушіння, зниження витрат на експлуатацію та енергетичної незалежності. Важливим постає питання стабілізації процесу сушіння за умов нестабільності джерела енергії.
2. Ефективність та стабільність сонячного сушіння визначається вибором методу теплозабезпечення. Відкрите сушіння – найдешевше та найдоступніше, але має високі ризики втрати врожаю. Пряме – краще за інтенсивністю, але має ризики погіршення якості продукту від впливу УФ-випромінювання і залежне від сонячної радіації. Непряме сушіння має кращу інтенсивність за пряме, характеризується вищими показниками якості, але дорожче і також залежне від сонячної радіації. Змішане сушіння поєднує переваги прямого та непрямого, але також залежне від інсоляції. Комбіноване – вирішує проблему нестабільності, але дорожче.
3. Пасивна конвекція – найдешевша, але має низький потенціал. Активна конвекція сприяє вищій інтенсивності сушіння, але дорожча і потребує джерела струму. Змішана конвекція поєднує відносну дешевизну в порівнянні з активною та відносно вищу інтенсивність сушіння в порівнянні з пасивною.
4. Чуттєва акумуляція – найдешевша, однак нестабільна за температурним режимом. Фазозмінні матеріали мають високу енергетичну щільність при фазовому переході та підтримують відносно стабільний режим температури, але дорожчі та втрачають свої властивості з часом. Десикантні матеріали осушують повітря та виділяють теплоту при зниженні інсоляції, але втрачають свою ефективність з часом та мають низький потенціал теплоти.
5. Шафові сушарки – найпростіший тип за будовою камери, але мають обмеження за площею завантаження. Стелажні вміщують більше, займаючи меншу площу, однак сушіння нерівномірне по висоті шафи. Тунельні вміщують велику кількість продукту, мають ефективну систему вентиляції, однак мають складність керування температурним режимом і нерівномірність сушіння по довжині тунелю. Тепличні також покривають промислові потреби, але супроводжуються швидкою втратою теплоти в несонячні години, гіршою вентиляцією, ніж тунельні, та ризиками конденсації на стінках.
6. Порівняння різних методів показало, що жоден тип сушарок не є універсальним для конкретного продукту та умов використання. Вибір повинен здійснюватись, виходячи з урахування виду продукції, кліматичних умов, вимог дотримання санітарних норм і якості продукту та економічної спроможності.
7. Найбільш перспективним методом є комбіноване сонячне сушіння, так як воно здатне за правильних інженерних розрахунків підтримувати стабільність процесу сушіння до необхідної вологості для будь-якого продукту. Додаткові джерела енергії або акумулюючі матеріали допомагають уникнути зупинки сушіння через мінливість сонячного випромінювання.
8. Удосконалення конструктивних схем геліосушарок та методів сушіння є перспективним напрямом для підвищення енергоефективності сушіння, декарбонізації процесів післязбиральної обробки, зменшення витрат продукції, зниження експлуатаційних витрат та розширення практичного застосування сонячних сушарок.

ПОСИЛАННЯ

1. Crippa, M., Solazzo, E., Guizzardi, D., Monforti-Ferrario, F., Tubiello, F. N., & Leip, A. (2021). Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. *Nature Food*, 2(3), 198–209. <https://doi.org/10.1038/s43016-021-00225-9>
2. Ritchie, H. (2019, November 6). Food production is responsible for one-quarter of the world's greenhouse gas emissions. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/food-ghg-emissions>
3. El-Sebaii, A. A., & Shalaby, S. M. (2012). Solar drying of agricultural products: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.134>
4. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2019). Summary for policymakers: Special report on climate change and land. IPCC. <https://www.ipcc.ch/srccl/chapter/summary-for-policymakers/>

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СНІГОВОГО ПОКРИВУ НА ПОВЕРХНІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ НА ГЕНЕРАЦІЮ СЕС

А. О. Павлов¹, О. М. Мороз², О. О. Мірошник²

¹СК МОНОЛИТ, вул. Велика Панасівська, 181, м. Харків, 61017, Україна,
тел.: (050) 343-70-80, e-mail: andriy_pavlov@me.com

²Державний 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.

У роботі представлено результати експериментальних досліджень впливу снігового покриву на генерацію сонячної електростанції, яка розміщена у м. Мерефа Харківської області, особливістю якої є наявність механічних пошкоджень фотоелектричних модулів, отриманих внаслідок ракетного удару.

Ключові слова: сонячна електростанція, сніговий покрив, прогнозування генерації, втрати енергії, фотоелектричні модулі, активна потужність, стрінги.

RESEARCH ON THE IMPACT OF SNOW COVER ON THE SURFACE OF PHOTOELECTRIC MODULES ON THE GENERATION OF SPP

A. O. Pavlov¹, O. M. Moroz², O. O. Miroshnyk²

¹BK MONOLYT, str. 181 Velyka Panasivska, Kharkiv, 61017, Ukraine,
phone: (050) 343-70-80, e-mail: andriy_pavlov@me.com

²State 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 the impact of snow cover on the generation of a solar power plant located in the city of Merefa, Kharkiv region, a feature of which is the presence of mechanical damage to photovoltaic modules resulting from a missile strike.

Key words: solar power plant, snow cover, generation forecasting, energy losses, photovoltaic modules, active power, strings.

ORCID: ¹0000-0001-9943-4084; ²0000-0002-8520-9211; ³0000-0002-6144-7573.

Важливим питанням для підвищення надійності енергосистеми України є прогнозування генерації сонячних електростанцій (СЕС). Одним із чинників суттєвого зменшення генерації СЕС є сніговий покрив на поверхні фотоелектричних модулів (ФЕМ) [1]. Місячні втрати енергії PV систем від снігу у сніжні періоди року можуть бути до 90%, річні втрати енергії від снігу можуть бути від 1% до 12% [2]. У регіонах холодного клімату сніг може зменшити вихідну потужність PV системи до 100% протягом окремих місяців і до 34% щорічно [3]. Експериментальними дослідженням було встановлено, що при товщині шару снігу 6 см на поверхні ФЕМ потужність модуля зменшується до 0 [4]. Модель [5] виконує розрахунки впливу на потужність СЕС снігового покриву від 0 до 630 см, розрахунок впливу починається із товщини шару снігу в 1 см. Також модель SAM припускає, що якщо стрінг частково покритий снігом, його генерація дорівнює нулю.

В Україні в останні роки сніговий покрив у зимові періоди спостерігається відносно рідко, але зима 2025-2026 рр. була аномально сніжною. Так на території СЕС, яка знаходиться у м. Мерефа Харківської області, з 11.11.2025 року по 6.03.2025 року було зафіксовано 55 днів (48% від періоду спостереження) коли ФЕМ станції були покриті шаром снігу різної товщини і з різними відсотками покриття поверхні модулів, із них у листопаді – 1 день, у грудні – 12 днів, у січні – 27 днів, у лютому – 14 днів, у березні – 1 день. Таким чином визначення впливу снігового покриву на поверхні ФЕМ на генерацію СЕС є актуальною проблемою.

Експериментальні дослідження впливу снігового покриву на генерацію СЕС проводились на СЕС потужністю 2,4 МВт (потужність визначена за номінальною потужністю ФЕМ), яка розміщена на території м. Мерефа Харківської області [6]. Тип фотоелектричних модулів – монокристалічні модулі RISEN RSM72-6-365M-5BB (номінальна потужність 365 Вт, температурний коефіцієнт потужності -0,39 %/°C), загальна кількість модулів 6598 штук. ФЕМ розміщені у книжковому форматі у два ряди на спеціальних столах з фіксованим оптимальним кутom нахилу у 27°, з'єднані у стрінги по 16 одиниць, і мають орієнтацію у 180°, тобто вони зорієнтовані на південь. На території станції було

розміщено 18 рядів ФЕМ, відстань між рядами 10,9 м, ширина поверхні рядів 3,92 м, граничний кут затінення рядів модулів $13,6^\circ$, коефіцієнт покриття поверхні землі станції (Ground Coverage Ratio - GCR) 35,9 %. Для перетворення постійного струму у змінний встановлені інвертори Huawei SUN2000-60KTL-M0, номінальною потужністю 60 кВт у кількості 33 одиниць та один інвертор SUN2000-33KTL-A потужністю 33 кВт. На кожний вхід MPPT інвертора було під'єднано два паралельних стрінги, таким чином кожний інвертор мав 12 стрінгів. Для моніторингу роботи станції, збору, зберігання і обробки інформації встановлено промисловий логер SmartLogger 1000 та NetEco 1000S. Для реєстрації параметрів погоди на території станції була встановлена метеостанція Meteoscanner 937PRO. Особливістю станції є те, що по ній був нанесений ракетний удар військами РФ у травні 2022 року, внаслідок чого були пошкоджені захисне скло та задні захисні плівки значної кількості ФЕМ, що в свою чергу призвело до виникнення мікротріщин та фрагментації захисного скла модулів, а також до розривів та пошкодження електропровідних стрічок модулів. Для відновлення роботи СЕС були видалені повністю пошкоджені модулі, проведено сортування модулів і створені нові стрінги з модулів, які мали подібні пошкодження. Після часткового відновлення потужність СЕС була біля 80% від номінальної потужності.

Дослідження впливу снігового покриву на генерацію СЕС проводилось з 11.11.2025 р. по 6.03.2026 р. Так на рис. 1, у якості прикладу, показано стан поверхні ФЕМ 10.02.2026 року о 8:57, який залишився від снігового покриву від 31.01.2026 (товщина ~20 мм, площа покриття 100%). Стан покриву змінювався під впливом сонячного випромінювання, але не значно, оскільки, у цей період спостерігалися низькі температури. Під дією сонячного випромінювання відбувалося танення снігу на верхніх рядах модулів і утворення крижаного покриву в нижніх частинах модулів верхнього ряду та майже по всій поверхні модулів нижнього ряду. Товщина сніго-льодового покриву на нижньому ряду становила від 10 мм (верхня частина модулів) до 15 мм (нижня частина), при 100% покритті, товщина сніго-льодового покриву на верхньому ряду була від 2 мм до 12 мм, покриття становило 25-30%. Незважаючи на покриття поверхні модулів сніго-льодовим шаром модулі генерували електричну енергію, параметри струму та напруги стрінгів інвертора 3.11 та 3.12 показані на рис. 2.

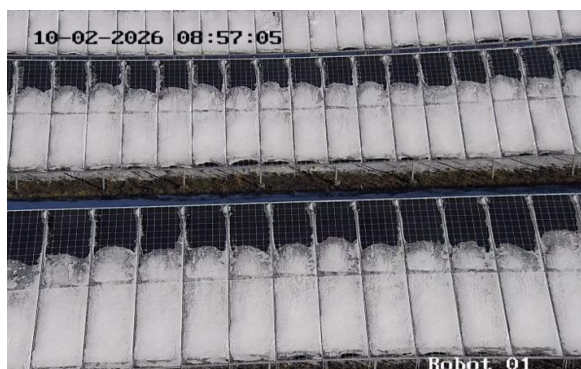


Рисунок 1 – Стан поверхні ФЕМ 10.02.2026

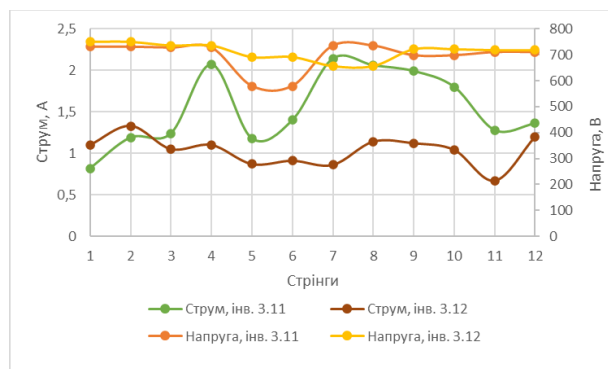


Рисунок 2 – Струми та напруги стрінгів інверторів 10.02.2026

Як видно струми стрінгів верхнього ряду модулів (інв. 3.11) були більшими, а струми нижнього ряду були меншими (інв. 3.12), напруга стрінгів була біля 700 В. Провал струмів стрінгів 1, 2, 5, 6, 11 та 12 пояснюється різним станом модулів після ракетного удару. Незважаючи на те що, поверхня модулів верхнього ряду мала 70-75% поверхні вільної від сніго-льодового шару, максимально струми відрізнялися у 2 рази, відповідно так відрізнялися і потужності стрінгів. ФЕМ станції мають три шунтувальні діоди, і відповідно модуль складається з трьох «підмодулів», що дозволяє збільшити потужність модуля при його частковому затіненні, але льодово-сніговий покрив знаходився у нижній частині модуля, то всі підмодулі були у однакових умовах, і шунтуючі діоди не мали особливого впливу на генерацію.

Для аналізу режимів роботи СЕС вибрані дні з особливими сніжними покривами на поверхні ФЕМ, це 6.01.2026 коли поверхня модулів була 100% покрита шаром снігу товщиною 30 мм. Генерація за день склала 37 кВт·год, максимальна годинна потужність була 8 кВт, максимальна сонячна радіація була біля 20 Вт/м², температура повітря протягом світлового дня була від -4°C до $-0,2^\circ\text{C}$. Таким чином можна стверджувати, що при товщині шару снігу 30 мм та 100% покритті поверхні генерація СЕС відсутня, незначна генерація пояснюється тим, що ФЕМ одного стрінгу внаслідок дії вітру мали меншу товщину шару снігу, що і призвело до досягнення на MPPT вході інвертора мінімальної напруги, і відповідно інвертор генерував енергію. Характерним днем для роботи СЕС було 21.02.2026 року, коли о 9 годині ранку поверхня модулів була 100% покрита шаром снігу товщиною 20 мм, температура повітря була $-8,8^\circ\text{C}$, сонячна радіація – 156 Вт/м², хмарність – відсутня. За рахунок сонячної радіації та підвищення температури повітря до $-2,6^\circ\text{C}$ (13:00) відбулося танення снігу на поверхні модулів, які були повністю вільні від снігу о 13 годині, внаслідок чого потужність СЕС вийшла на максимальне значення для цього періоду року. Графік потужності СЕС 21.02.2026 року приведений на рис. 3. Як видно потужність СЕС з моменту її запуску до 13 години змінювалась нерівномірно в залежності від зменшення частки поверхні модулів, які були вкриті снігом, та зменшення товщини

шару снігу. Для визначення впливу шару снігу на поверхні ФЕМ був праведний порівняльний аналіз потужності СЕС о 9 годині, коли модулі повністю були вкриті снігом, та о 14:40 годині, коли модулі були вільні від снігу, при однакових значеннях сонячної радіації 156 Вт/м². Потужність СЕС о 9 годині була 160 кВт, а о 14:40 – 1300 кВт, таким чином потужності відрізнялися майже у 8 разів. Враховуючи зміну температури ФЕМ під дією сонячної радіації, використовуючи емпіричну формулу [7] було визначено, що температура модуля о 14:40 була 27°C. Враховуючи температурний коефіцієнт потужності ФЕМ, значення якого -0,39 %/°C, потужності СЕС о 9 та 14:40 були перераховані на температуру 25°C, і відповідно, ці значення були 138 кВт і 1290 кВт, таким чином потужність СЕС у ясний день при 100% покритті поверхні модулів та товщині шару снігу 20 мм зменшилась у 9,4 рази. Графіки потужності стрінгів станції показані на рис. 4. Як видно характер змін потужності стрінгів співпадає із графіком потужності СЕС але оскільки поверхня модулів очищавась від снігу з різною інтенсивністю, то і потужності стрінгів різні.

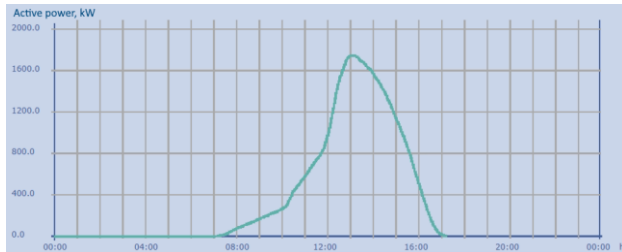


Рисунок 3 – Графік активної потужності СЕС
21.02.2026

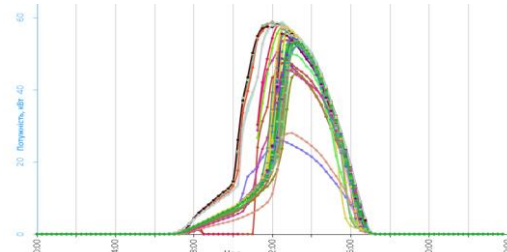


Рисунок 4 – Графіки активної потужності стрінгів
21.02.2026

Таким чином експериментально встановлено, що при товщині снігу 30 мм та 100% покритті генерація СЕС фактично відсутня. Порівняльний аналіз у ясний день (при однаковій інсоляції 156 Вт/м²) показав, що 100% покритті модулів шаром снігу товщиною 20 мм вихідна потужність СЕС зменшується у 9,4 раза (зі 1290 кВт до 138 кВт після температурної корекції). Встановлено що під дією сонячного випромінювання сніг спочатку тоне на верхніх рядах модулів і це призводить до утворення при низьких температурах крижаного шару в нижніх частинах модулів, внаслідок чого потужності стрінгів ФЕМ суттєво відрізняються, особливо ті, які зазнали механічних пошкоджень після ракетного удару навіть за однакових умов засніженості.

ПОСИЛАННЯ

1. Аналіз ефективності генерації електроенергії на основі сонячної енергії в Вінницькій області. МІ Стаднік, ОО Рубаненко, СВ Бондаренко - Техніка, енергетика, транспорт АПК, 2016. <https://repository.vsa.u.org/card.php?lang=en&id=19576> (дата звернення: 15.03.2026).
2. Marion, B., Schaefer, R., Caine, H., & Sanchez, G. (2013). Measured and modeled photovoltaic system energy losses from snow for Colorado and Wisconsin locations. *Solar Energy*, 97, 112–121. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X13003034> (дата звернення: 10.03.2026).
3. Gustav Öhgren, Lisa Molin, Mattias Lindh, David Lingfors, Johan Lindahl. Remote sensing compatible snow loss modelling for PV power simulations. *Solar Energy*, Volume 303, 2026, 114132, ISSN 0038-092X. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.114132> (дата звернення: 10.03.2026).
4. Quan, Z., Lu, H., Zheng, C., Zhao, W., Xu, Y., Qin, J., & An, F. (2023). Experimental Measurement and Numerical Simulation on the Snow-Cover Process of Solar Photovoltaic Modules and Its Impact on Photoelectric Conversion Efficiency. *Coatings*, 13(2), 427. <https://doi.org/10.3390/coatings13020427> (дата звернення: 10.03.2026).
5. Gilman, P.; Dobos, A.; DiOrio, N.; Freeman, J.; Janzou, S.; Ryberg, D. (2018) SAM Photovoltaic Model Technical Reference Update. 93 pp.; NREL/TP-6A20-67399. <https://docs.nrl.gov/docs/fy18osti/67399.pdf> (дата звернення: 10.03.2026).
6. Мороз, О. М., О. О. Мірошник, А. О. Павлов, О. А. Савченко, 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. 114-23, <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.04> (дата звернення: 10.03.2026).
7. Павлов А. О., Мороз О. М., Мірошник О. О. Експериментальні дослідження зміни температури поверхні фотоелектричних модулів СЕС. XXVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» Україна. Київ. 21–23 травня 2025 року. С. 291, 292. https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Tezy_2025.pdf (дата звернення: 15.03.2026).

PREPARATION AND MORPHOLOGICAL STUDIES OF SOLID SOLUTIONS OF $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$

**Alijon Razzokov¹, Amin Saidov², Malika Shonazarova³, Jaloliddin Razzakov¹,
Durdona Koshchanova¹**

¹ Urgench State University, 14 Kh. Alimdjani, Urgench, 220100, Uzbekistan

² Physical-Technical Institute NPO "Physics-Sun of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan, 2B, Ch. Aitmatov St., Tashkent, 100084, Uzbekistan

³ Leipzig University, 10 Augustplatz, Leipzig 04109, Germany
phone: (897) 192-54-70, e-mail: dona23042014@gmail.com

Key words: epitaxial layer, heterostructure, solid solution, dislocation.

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-2210-6207>; ¹<https://orcid.org/0009-0003-0927-2475>

Abstracts of conference reports Single-crystal films of the $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ solid solution from a limited tin melt solution were grown on Ge and GaAs substrates using an EPOS setup in the temperature range from 1023 K to 803 K at a cooling rate of 1-1.5 K/min. A quantum dot with a width of 110 nm and a height of 14 nm was found to form in the near-surface layer.

The cultivation of crystalline perfect semiconductor solid solutions is of undoubted interest for the development of modern semiconductor instrumentation, since a solid solution synthesized from several semiconductor components can combine the advantages of each of them [1,2]. Varizional solid solutions belonging to the class $(\text{C}^{\text{IV}})_{1-x}(\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}})_x$ provide the opportunity to vary the main electrophysical and photoelectric parameters of semiconductor materials over wide limits by changing their chemical compositions [3,4].

Defects and dislocations at the substrate-film interface serve as additional recombination centers; they significantly reduce the separation coefficient of light-generated electron-hole pairs in photovoltaic converters [5].

Crystalline perfect epitaxial layers of $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ were grown from a limited tin melt solution with forced cooling (at a rate of 1-1.5 K/min) in the temperature range from 1023 K to 803 K on Ge(111), GaAs(100) substrates. A detailed description of the technique used is presented in [6]. The resulting epitaxial layers were single-crystal and had a sphalerite-type lattice, which was confirmed by XRD studies.

The resulting solid solution films were mirror-smooth, and we conducted morphological studies to examine their surfaces. Three-dimensional images of the $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ epitaxial film surface, obtained using an atomic force microscope, revealed that a quantum dot with a width of 110 nm and a height of 14 nm is formed in the near-surface layer (Fig. 1a, b). The dipole-shaped quantum dots that form the film are oriented strictly in the same direction, with the same tilt, indicating the ordering of the grown layers and the single-crystal nature of the resulting epitaxial film. The figure also shows that the film layers formed consist of pairs of ordered nanoclusters. This is likely due to the potential field of the surface layer.

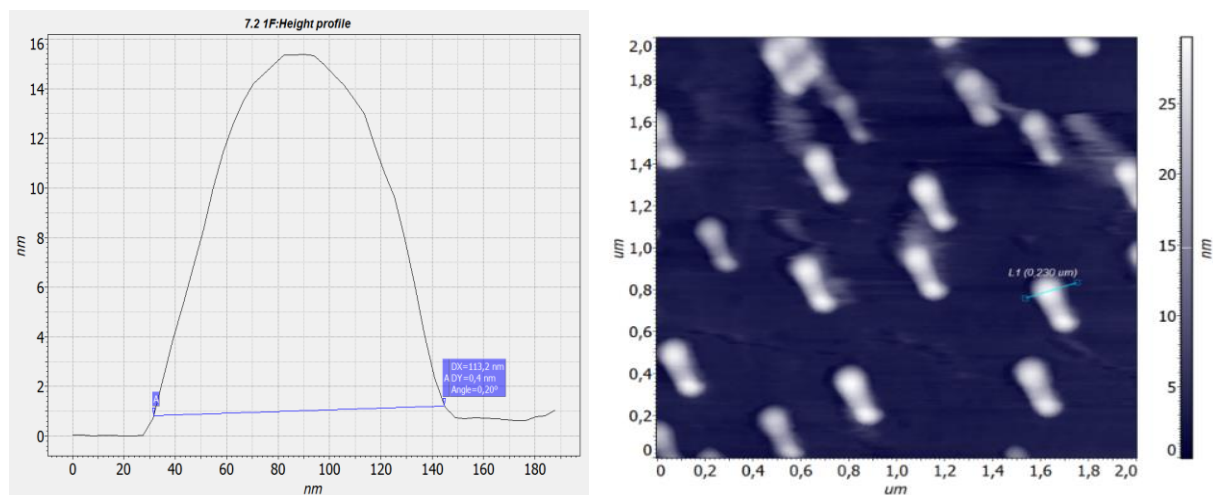


Fig. 1. Three-dimensional (a) (image size $2 \times 2 \mu\text{m}^2$) and two-dimensional (b) image of the surface of epitaxial films of $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$, (quantum dot size: width 110 nm, height 14 nm)

According to experimental data, the dislocation density N_D in the grown $(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ semiconductor solid solutions depended on many process parameters: growth temperature, forced-cooling rate, substrate orientation and purity, and solvent type. Therefore, to reduce the dislocation density, experiments were conducted at different T_{NC} values.

Subsequently, some electrophysical properties of the obtained films were investigated: the specific resistance, Hall mobility and concentration of charge carriers at a temperature of 300 K were determined: $\rho = 0.5 \div 5 \text{ Ohm}\cdot\text{cm}$, $\mu_p = 30 \div 60 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $n_p = (5 \div 7) \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. The films had hole-type conductivity.

The technological conditions for producing $\text{GaAs}-(\text{Ge}_2)_{1-x}(\text{ZnSe})_x$ heterostructures from a $\text{Ge} + \text{ZnSe} + \text{Sn}$ system using supercooling without dissolving the "foreign" substrate were experimentally established. It was found that the lowest dislocation density values ($N_D = 2 \times 10^4 \div 10^5 \text{ cm}^{-2}$) were recorded in epitaxial films at $T_{NC} = 893 \text{ K}$. In the future, these solid solutions, as a graded-gap semiconductor material with controlled electrophysical and photoelectric properties, can be used in the field of semiconductor instrumentation.

REFERENCES

1. Wang Y. et al. Bandgap broadly tunable GaZnSeAs alloy nanowires // *Physical Chemistry Chemical Physics*. – 2013. – Vol. 15. – №. 8. – P. 2912-2916.
2. Huang W. et al. Composition-dependent perfect band gap tuning of $\text{ZnS}_{1-x}\text{Se}_x$ solid solutions for efficient photocatalysis // *Journal of Physics and Chemistry of Solids*. – 2019. – Vol. 130. – P. 41-45.
3. Schorr S. et al. Electronic band gap of $\text{Zn}_{2x}(\text{CuIn})_{1-x}\text{X}_2$ solid solution series ($X = \text{S}, \text{Se}, \text{Te}$) // *Journal of alloys and compounds*. – 2006. – Vol. 414. – №. 1-2. – P. 26-30.
4. Kaji M. et al. Liquid-phase epitaxy of $\text{GaAs-ZnSe Ga}_2\text{Se}_3$ alloy crystals on a ZnSe substrate // *Journal of crystal growth*. – 1997. – Vol. 178. – №. 3. – P. 242-245.
5. D.W. Parent, A. Rodriguez, J.E. Ayers, F.C. Jain. Photoassisted MOVPE grown $(n)\text{ZnSe}/(p+)\text{GaAs}$ heterojunction solar cells. *Solid-State Electronics*. 2003, Vol.47, Iss.4, P.595-599. [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(02\)00334-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(02)00334-9)
6. Saidov A. S., Razzokov A. S. Obtaining and morphological studies of epitaxial layers of the $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ solid solution // *Siberian Physical Journal*. – 2020. – Vol. 15. – №. 2. – P. 84-91.

GROWING A GRADED-BAND SOLID SOLUTION OF $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ ($0 < x < 1$) FROM A TIN SOLUTION-MELT

Alijon Razzokov¹, Sevara Abdullayeva¹

¹ Urgench State University, 14 Kh.Alimdjan, Urgench, 220100, Uzbekistan
phone: (897) 856-14-94, e-mail: abdullayevasevara1494@gmail.com

Key words: epitaxy, X-ray diffractogram, crystallization, graded-gap, dislocation, sedimentation.

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-2210-6207>

Abstracts of conference reports Structurally perfect epitaxial $\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$ layers on a Si(111) substrate were obtained experimentally using a smoothly variable structure composition, correspondingly smoothly varying the lattice parameters of a graded-gap solid solution. The optimal growth process mode was selected to produce epitaxial layers with the lowest dislocation densities. The dependence of the film's crystalline perfection on the distance between the substrates ($d < 1.2$ mm) and their arrangement in the cassette was demonstrated.

Improving the technology for producing high-quality thin layers of semiconductor material using liquid-phase epitaxy, with specified electrical and photoelectric properties and minimal dislocations and defects on an inexpensive substrate such as silicon, is a highly relevant topic [1, 2].

At present, heterostructures based on solid solutions of A^{IV}B^{IV} class compounds are used to create semiconductor devices. These solid solutions and the heterostructures obtained on their basis have a significant drawback, which consists in the mismatch of the lattice parameter ' α ' and the thermal expansion coefficients ' α ' (TEC) of the substrate and the crystallized layer ($\alpha_{\text{Si}} = 5,431 \cdot 10^{-10} \text{m}$, $\alpha_{\text{Ge}} = 5,658 \cdot 10^{-10} \text{m}$, $\alpha_{\text{Si}} = 5,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$, $\alpha_{\text{Ge}} = 6,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$). As a result, many defects are formed in the film [3,4]. This is of great importance for the production of photovoltaic devices, including photoconverters operating in the IR (infrared) region. On the other side, it serves as a buffer layer for obtaining, and other perfect crystalline structures with the lowest dislocation densities.

To grow a graded-gap solid solution ($0 < x < 1$), we used a vertical quartz reactor with horizontally positioned substrates in an EPOS-type setup. A study of the surface chemical composition and cleavage of the grown epitaxial layers was conducted using a Zeiss SEM EVO MA 10 scanning electron microscope. The resulting raster patterns indicated a nearly uniform distribution over the epitaxial layer surface and variability of the solid solution across its thickness. Inclusions of macroscopic defects and a second phase were absent in the film layers. XRD measurements demonstrated the single-crystal nature of the resulting solid solution.

The surface morphology of the obtained films was studied and their single-crystallinity (along the (111) substrate direction) was determined using an MIM-8M metallographic microscope. We selected the etchant composition (mixtures of concentrated hydrofluoric (HF), nitric (HNO₃), and acetic (CH₃COOH) acids in the ratios 1 part HF + 3 parts HNO₃ + 4 parts CH₃COOH). To identify dislocation etch pits on the (111) plane, the samples were etched in solution, then the etchant was diluted with deionized water and washed. To determine the dislocation density (ND), 6-7 counts were made on each layer-by-layer sample. The obtained experimental data showed that the dislocation density (N_D) of the grown semiconductor solid solutions depends on all process parameters, including the location of the substrates (lower or upper).

In our experiments, we found that by varying the gap between the substrates, d (i.e., by changing the volume of the solution-melt between the substrates), under the same growth conditions, the grown epitaxial layers on the lower and upper substrates were identical, with crystalline perfection at the surface and at the substrate-film interface up to $d < 1.2$ mm. At $d \geq 1.2$ mm, thicker and lower-quality layers always form on the upper substrates than on the lower ones, which is due to diffusion and convection flows of components in the confined solution.

When growing epitaxial layers, the components of the silicon and germanium solid solution form clusters in the melt solution. Some clusters combine through coagulation (the higher the temperature, the higher the coagulation number) of identical solution components, forming clusters 1-10 nm in size. We calculated this theoretically using the Einstein-Smoluchowski formula, which account for a small fraction of all dissolved elements. These clusters, while participating in the growth process at lower concentrations than in the grown components, do not destroy the single-crystal nature of the graded-gap solid solution. However, nanoclusters larger than 15 nm promote the formation of dislocations both at the substrate-film interface and along the film growth direction, which degrades the crystalline integrity of the films and

structures, and consequently their electrophysical and photoelectric properties, which are crucial parameters in instrumentation applications.

The use of sedimentation analysis to determine the particle size of the highly dispersed (ultramicroheterogeneous) phase made it possible to determine the r -radius of the particles and the state of the Si, Ge components in solution using the following formula [17]:

$$r = \sqrt{\frac{9\eta\Delta h}{4g(\rho_{DP} - \rho_{DM})t}}$$

Where, η - solution viscosity; t – time interval from the beginning of crystallization; Δh - differences in melt thickness; ρ_{DP} , ρ_{DM} - density of the dispersion medium (DM) and dispersed phase (DP), respectively; g - acceleration of gravity.

The obtained experimental data can be used to obtain solid solutions on a silicon substrate with the lowest dislocation densities and given electrophysical and photoelectric parameters in the manufacture of photoconverters and optoelectronic devices based on them.

REFERENCES

1. Fadaly E.M.T., Dijkstra A., Suckert J.R., Ziss D., Tilburg M.A.J.v., Mao C., Ren Y., Lange V.T.v., Kölling S., Verheijen M.A., Busse D., Rödl C., Furthmüller J., Bechstedt F., Stangl J., Finley J.J., Botti S., Haverkort J.E.M., Bakkers E.P.A.M. Direct-bandgap emission from hexagonal Ge and SiGe alloys // *Nature*. 580, (2020). p205–209.
2. Kwang-Won Jo, Wu-Kang Kim, Mitsuru Takenaka, and Shinichi Takagi. Impact of SiGe layer thickness in starting substrates on strained Ge-on-insulator pMOSFETs fabricated by Ge condensation method // *Appl. Phys. Lett.* 114, 062101 (2019).
3. Usmonov Sh.N. Influence of GaAs Molecules on the Photosensitivity of p-Si–n-(GaSb)_{1-x}(Si₂)_x and n-GaAs–p-(InSb)_{1-x}(Sn₂)_x Heterostructures // *Applied Solar Energy*. New York, 2016. Vol.52, No.3. pp. 211–214.
4. Timofeev V.A. Morphology and structure of the surface at the initial stages of film growth and on . Dissertation, A.V. Rzhzanov Institute of Semiconductor Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 2014.
5. A.Sh.Razzokov. et al. Features of growing Si- and Si_{1-x}Gex -single-crystal films from solution-melt based on tin. *Journal of Physical Studies*. – 2022. – Vol. 26. – No. 4. – P. 4601-1–4601-5.

OPTIMIZING ANTI-REFLECTION LAYERS FOR PEROVSKITE LATERAL HETEROJUNCTION SOLAR CELLS

Irodakhon Gulomova¹, Rayimjon Aliyev²

Andijan state university,
129 University St., Andijan, Uzbekistan, 170100
phone: (+99899) 443-70-42, e-mail: irodakhon.gulomova@yahoo.com

This scientific study investigated three dielectric materials: SiO₂, Al₂O₃, and Si₃N₄—as anti-reflection coatings on the surface of a perovskite-based lateral heterojunction solar cell, and their optimal thicknesses were determined. As a result, it was found that the efficiency of the perovskite-based lateral heterojunction solar cell increased by 1.6 times.

Key words: perovskite solar cells, lateral heterojunction, anti-reflection coating, dielectric materials, thickness optimization, optical losses reduction.

ORCID: ¹0009-0007-6760-0018.

Abstracts: Perovskite-based solar cells have attracted significant research attention in recent years due to their high power conversion efficiency and promising optoelectronic properties [1]. Their simple fabrication process and tunable bandgap make them highly suitable for next-generation photovoltaic applications. In our previous study, we simulated the perovskite-based lateral heterojunction solar cell and investigated its performance [2]. The results indicated that the proposed structure achieves a high photovoltaic efficiency.

However, one of the main optical losses in solar cells occurs due to the reflection of incident light at the front surface. This phenomenon significantly reduces the cell's efficiency. It is primarily associated with the large difference in refractive indices between air ($n = 1$) and the perovskite layer ($n = 2.6$), which causes considerable reflection at the surface interface. To minimize reflection losses, the refractive index of the anti-reflection layer should ideally correspond to the geometric mean of the refractive indices of air and the perovskite layer [3]. For the air/perovskite interface the optimal refractive index of the anti-reflection coating is approximately 1.6. The refractive indices of the selected dielectric materials, Silicon Dioxide ($n \approx 1.45$), Aluminium Oxide ($n \approx 1.7$), and Silicon Nitride ($n \approx 2.0$), are close to this value, which makes them suitable candidates for anti-reflection coatings. To determine the optimal thickness for each dielectric material, the layer thickness was varied from 60 nm to 100 nm in 10 nm increments. The results showed that the optimal thicknesses for SiO₂, Al₂O₃, and Si₃N₄ are 90 nm, 70 nm, and 60 nm, respectively.

The table below presents the main photovoltaic parameters of the perovskite-based lateral heterojunction solar cells with anti-reflection coatings at their optimal thicknesses (SiO₂, Al₂O₃, and Si₃N₄). The parameters include open-circuit voltage, short-circuit current, maximum power, fill factor, and power conversion efficiency.

material	thicknes, nm	U _{oc} , V	I _{sc} , mA/sm ²	P _{mpp} , mW/sm ²	FF, %	n _{eff} , %
SiO ₂	90	1.176	21.39	20.45	86,31	34.31
Al ₂ O ₃	70	1.182	21.47	21.78	85,87	34.42
Si ₃ N ₄	60	1.176	20.92	21.23	86,27	33.53

As a result, the perovskite-based lateral heterojunction solar cell with an anti-reflection coating achieved a power conversion efficiency of 34.42%. This value is 1.16 times higher than that of the structure without an anti-reflection coating, which had an efficiency of 29.9%.

REFERENCES

1. C. Yang, W. Hu, J. Liu, C. Han, Q. Gao, A. Mei, Y. Zhou, F. Guo, and H. Han, "Achievements, challenges, and future prospects for industrialization of perovskite solar cells," *Light, Sci. Appl.*, vol. 13, no. 1, pp. 1–48, Sep. 2024, doi: 10.1038/s41377-024-01461-x.
2. Gulomova I, Accouche O, Aliev R. Theoretical Optimization of Lateral Heterojunction Perovskite Solar Cells: A Structural Perspective. *IEEE Access*. 2025 May 19. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3571476
3. Alakel Abazid, M., Lakhal, A., & Louis, A. K. (2016). Inverse design of anti-reflection coatings using the nonlinear approximate inverse. *Inverse Problems in Science and Engineering*, 24(6), 917-935. <https://doi.org/10.1080/17415977.2015.1077446>

З'ЄДНАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНО-КЕРОВАНОМУ ДЖЕРЕЛІ ЕНЕРГІЇ

Д. В. Бондаренко¹

*Ін-т відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна,
тел: 38(050)972999, e-mail: dima7007bond@gmail.com*

Показана можливість під'єднання фотоелектричних елементів до загального кола джерела енергії за допомогою керованих ключів. Побудовані електричні кола керованих з'єднань для двох основних випадків включення генерувальних елементів в загальне коло джерела енергії. Побудована базові схеми керованої комутації фотоелементів в сонячному модулі чи сонячній панелі на основі використання польових транзисторів та програмованого логічного контролера, що дозволяє реалізувати інтелектуальне керування джерелом. Викладені результати, в яких зазначається, що використання керованих з'єднань при побудові фотоелектричних джерел енергії дозволяє отримати вихідні параметри різних значень та різної форми. Зроблені висновки.

Ключові слова: керовані з'єднання, динамічна комутація, сонячна панель, фотоелектричний елемент, інтелектуальне джерело енергії.

CONNECTION PHOTOVOLTAIC CELLS IN SMART CONTROLLED ENERGY SOURCES

D. Bondarenko¹

*Institute of renewable energy NAS of Ukraine,
Metrologichna str., 50, Kyiv, Ukraine,
tel: 38(050)972999, e-mail: dima7007bond@gmail.com*

The possibility of connecting photovoltaic elements to the general circuit of the energy source using controlled switches is shown. The electrical circuits of controlled connections are constructed for two main cases of including generating elements in the general circuit of the energy source. A basic circuit for controlled switching of photovoltaic cells in a solar module or solar panel has been built based on the use of field-effect transistors and a programmable logic controller, which allows for smart control of the source. The results are presented, which indicate that the use of controlled connections in the construction of photovoltaic energy sources allows obtaining output parameters of different values and different shapes. Conclusions are drawn.

Key words: controlled connections, dynamic commutation, solar panel, photovoltaic cell, smart energy source.

ORCID: 0000-0002-5629-930X

Вступ.

В наш час, йде активний розвиток сонячної енергетики, при тому такий розвиток вказує на певні тренди, напрямки та аспекти розробки та впровадження фотоелектричних джерел [1, 2]. Так, зокрема, різноманітність застосування сонячних фотоелектричних джерел в побуті та промисловості спонукає до розробки джерел енергії з різноманітними вихідними параметрами. Так, шлях застосування об'єднання фотоелектричних елементів в сонячні модулі та сонячні панелі дозволяє збільшувати вихідний струм та вихідну напругу таких джерел.

На даний момент з'єднання генеруючих елементів в джерелах здійснюється фіксованим чином, за допомогою провідників та струмопровідних шин, що дозволяє отримати сталі вихідні значення напруги та струму. Але для зміни вихідних параметрів фотоелектричного джерела потрібно застосувати зовнішній перетворюючий пристрій, або змінити топологію електричного кола для отримання необхідних вихідних значень.

Для отримання змінних в часі вихідних параметрів сонячних джерел необхідно замінити фіксовані з'єднання комутаторами. Такі комутатори з'єднання повинні керуватись програмованим логічним контролером, який по заданому алгоритму керує комутаторами – ключами, які під'єднують чи від'єднують фотоелектричний елемент до загального

кола джерела енергії. Також такому випадку, вихідні значення генерувального джерела можуть змінюватись динамічно, тобто бути змінні з плином часу [3].

Типи з'єднань.

Під'єднання елементів до генерувального кола джерела здійснюється за допомогою керованих ключів та може бути реалізована двома способами.

Перший спосіб полягає в тому, що кожен фотоелектричний елемент, під'єднується до загального електричного кола послідовно з'єднаним ключем та шунтується паралельним ключем (рис.1). Таким чином, ми можемо або вводити генерувальну потужність в загальну систему або виводити її. Це, у випадку послідовного з'єднання, призводить до зміни вихідної напруги загальної системи. Також зазначимо, що у випадку паралельного під'єднання послідовних стрингів один до одного, подібний підхід призводить до зміни вихідного струму.

Другий спосіб полягає в тому, що створюється вузол комутації, який буде змінювати послідовні з'єднання елементів живлення на паралельні і навпаки, а також, за необхідності, здійснювати шунтування (рис.2). З рисунку 2 видно, що для здійснення комутації береться чотири ключа, які під'єднують вихідні виводи елементів живлення один до одного. І це реалізовано таким чином, що два ключі використовуються для замикання полюсів однієї полярності при паралельному з'єднанні і два ключі для з'єднання різноіменних полюсів при послідовному з'єднанні чи шунтуванні. Подібний підхід більш гнучко дозволяє змінювати вихідні значення напруги та струму за рахунок послідовно-паралельної комутації.

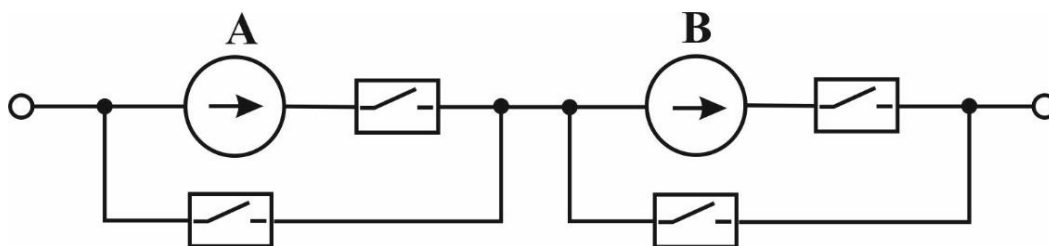


Рис.1. З'єднання для ведення чи виведення з загальної генерації фотоелементів

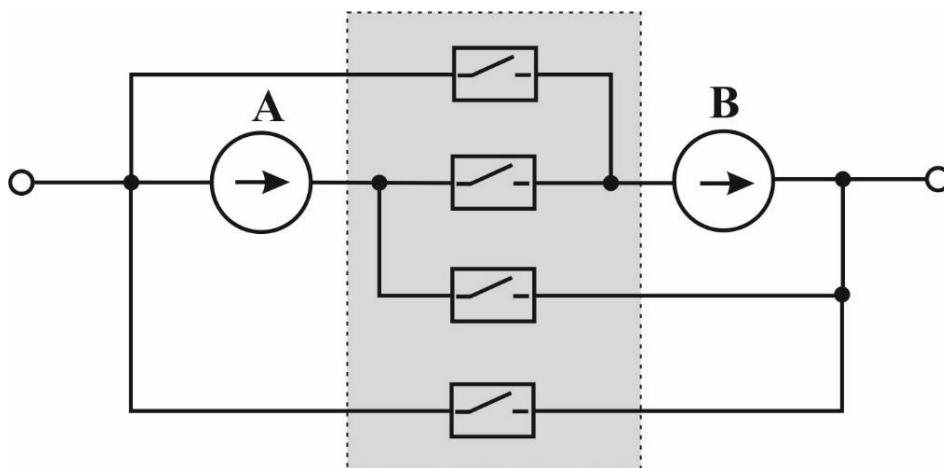


Рис.2. З'єднання генерувальних елементів за допомогою послідовно-паралельного вузла

Практична реалізація керованих з'єднань.

Була реалізована практичні схеми (рис.3 та рис.4) з'єднання двох джерел живлення за допомогою керованих з'єднувачів, згідно двох запропонованих типів комутації. Для здійснення таких комутацій, в якості керованих ключів, доцільно використовувати польові транзистори [4, 5]. Звернемо увагу на те, що для паралельного з'єднання в паралельно-послідовному комутувальному вузлі, треба використовувати по два транзистори, які включені назустріч, так як польові транзистори містять паразитний діод [4]. В якості керувального пристрою, для здійснення керованого перемикачання ключів, використовується програмно-керований логічний контролер (ПЛК) [6] та мікроконтролерні пристрої [7].

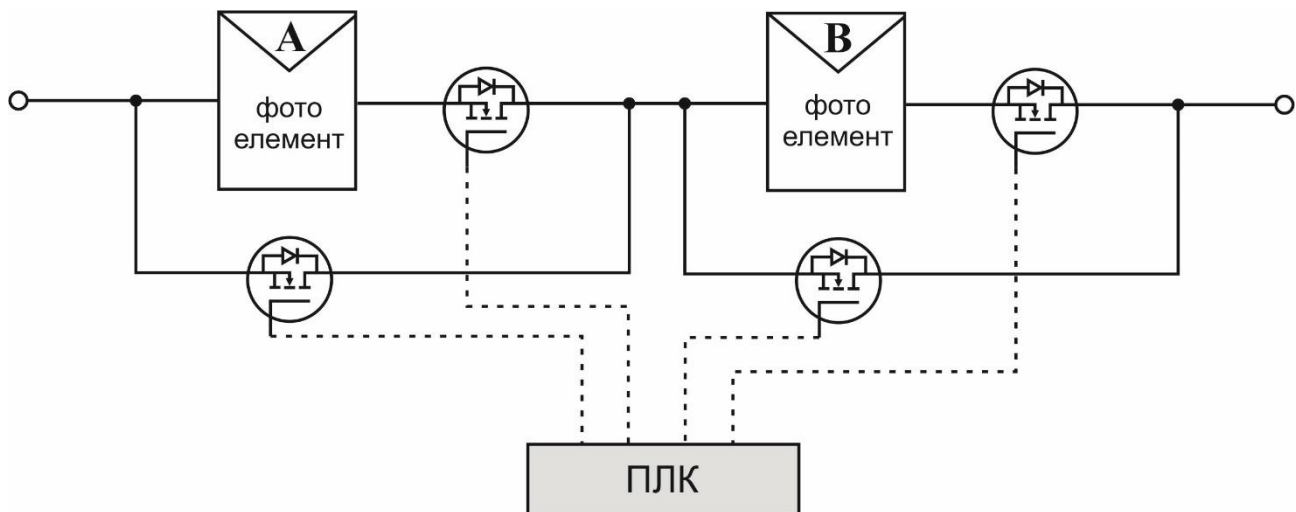


Рис.3. Схема з'єднання двох фотоелектричних елементів за допомогою включення в коло та шунтування

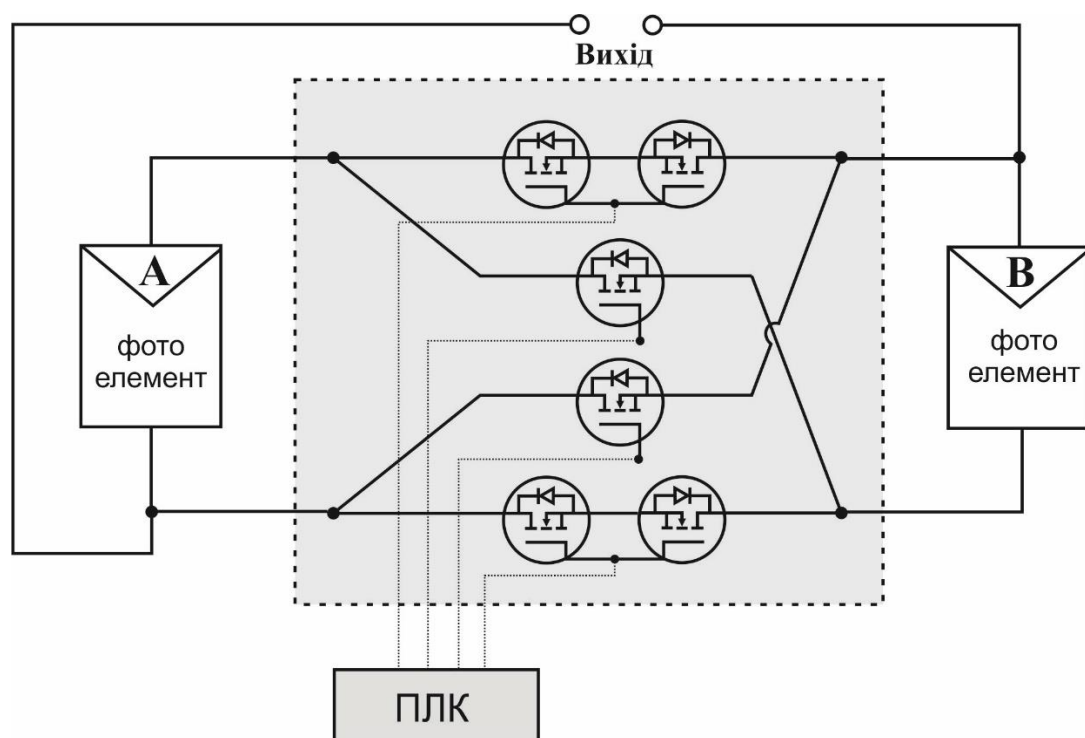


Рис.4. Схема з'єднання двох фотоелектричних елементів за допомогою вузла паралельно-послідовної комутації

Результати.

Таким чином, ми утворюємо вдосконалену енергетичну систему, яка використовує інтелектуальне обладнання для динамічного керування потужністю, дозволяючи джерелам працювати разом, оптимізуючи продуктивність, подовжуючи термін служби та створюючи модульні, адаптивні енергетичні рішення для енергетичних систем.

Важливим результатом реалізації керованих з'єднань є динамічна оптимізація, а саме те що система може змінювати властивості джерела у режимі реального часу, надаючи пріоритет певним вихідним параметрам залежно від застосування.

В одному з реалізованих схемотехнічних рішень, інтелектуальне керування джерелом, шляхом обходу слабших елементів, ізоляції несправних елементів або перерозподілу енергії, покращує загальну продуктивність енергетичної системи. В іншому рішенні універсальний комутаційний вузол дозволяє динамічно змінювати вихідні параметри без енергетичних втрат.

Застосування оптимальної топології [8] використання вузлів паралельно-послідовної комутації дозволяє отримувати широкий спектр вихідних значень джерела енергії та різну форму вихідного сигналу. Також зазначимо, що

застосування запропонованих з'єднань можна розширити на інші енергетичні відновлювані джерела енергії, такі як гібридний фотоелектричний тепловий колектор [9].

Висновки.

Інтелектуально-керована комутація є інструментом, який дозволяє створювати універсальні та адаптивні енергетичні системи. Застосування контрольованих з'єднань, є перспективним напрямком наукових досліджень та інженерії для створення універсальних генеруючих та інтелектуальних мереж.

ПОСИЛАННЯ

1. Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk T., & Sheiko, I. (2025). ACTUAL PATHWAYS FOR SOLAR ENERGY DEVELOPMENT BASED ON THE MATERIALS OF THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE «RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE 21ST CENTURY» 2025. Vidnovluvana Energetika, №3(82), 82-88. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).82-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).82-88)
2. Bondarenko, D., Matiakh, S., Surzhyk T., Sheiko, I., & Kravchenko M. (2024). DEVELOPMENT TRENDS OF SOLAR POWER ENGINEERING BASED ON THE MATERIALS OF THE SCIENTIFIC AND PRACTICAL CONFERENCE «RENEWABLE ENERGY AND ENERGY EFFICIENCY IN THE 21. Vidnovluvana Energetika, №3(78), 76-83. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83) [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3\(78\).76-83](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.3(78).76-83)
3. Bondarenko, D. (2021). DYNAMIC CONNECTION PV-CELLS IN SOLAR PANELS. Vidnovluvana Energetika, №3(66), 45-51. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3\(66\).45-513](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3(66).45-513).
4. Bondarenko, D. (2022). USING MOSFET-TRANSISTORS IN SOLAR PANELS. Vidnovluvana Energetika, №3(70), 62-67. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).62-67](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).62-67)
5. MOSFET. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/MOSFET>. 2026.
6. Programmable logic controller. Retrieved https://en.wikipedia.org/wiki/Programmable_logic_controller
7. Microcontroller. Retrieved from <https://en.wikipedia.org/wiki/Microcontroller>
8. Bondarenko, D. (2024). OPTIMAL TOPOLOGY OF ELECTRIC CIRCUITS IN PV-PANELS AND PV-PLANTS WITH USING CONTROLLED CONNECTIONS. Vidnovluvana Energetika, №1(76), 57-61. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).57-61](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).57-61)
9. Bondarenko, D. (2024). COMBINATION OF PVT-COLLECTORS WITH USING OF CONTROLLED CONNECTIONS. Vidnovluvana Energetika, №2(77), 86-91. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\).86-91](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77).86-91)

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕРЕЖЕВИХ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ПРИ РОБОТІ З ГЕНЕРАТОРОМ В АВТОНОМНОМУ РЕЖИМІ

В. С. Степенко

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

Досліджено способи підвищення ефективності мережесонячних фотоелектричних систем при роботі з генератором в автономному режимі в умовах нестабільного електропостачання. Основну увагу приділено взаємодії мережевого інвертора та генератора, що забезпечує безперервну роботу сонячної електростанції при відсутності зовнішньої мережі. Показано, що використання газових генераторів замість дизельних підвищує загальну ефективність системи за рахунок зниження витрат палива та зменшення викидів CO₂ до 25 %. Запропонований підхід підвищує надійність, енергоефективність та екологічні характеристики систем електропостачання підприємств.

Ключові слова: мережева сонячна електростанція, газовий генератор, мережевий інвертор, автономний режим, енергоефективність.

IMPROVING THE EFFICIENCY OF GRID-CONNECTED PHOTOVOLTAIC SYSTEMS OPERATING WITH A GENERATOR IN ISLANDED MODE

V. Stepenko

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

This paper investigates methods for improving the efficiency of grid-connected photovoltaic (PV) systems operating with a generator in islanded mode under unstable grid conditions. The study focuses on the interaction between a grid-tied inverter and a generator, which enables continuous PV operation during grid outages. It is shown that the use of gas generators instead of diesel ones improves overall system efficiency by reducing fuel consumption and lowering CO₂ emissions by up to 25%. The proposed approach enhances the reliability, energy efficiency, and environmental performance of industrial power supply systems.

Key words: grid-connected PV system, gas generator, grid-tied inverter, islanded operation, energy efficiency.

Мережеві сонячні електростанції традиційно орієнтовані на роботу паралельно із зовнішньою електромережею, однак в умовах частих аварійних відключень для промислових підприємств актуальним стає забезпечення їх функціонування в автономному режимі. Одним із практичних рішень є використання генератора як джерела опорної напруги та частоти для мережевого інвертора. У такій конфігурації після зникнення напруги в зовнішній мережі генератор запускається, формує синусоїду 50 Гц, а інвертор синхронізується з нею та продовжує передачу енергії від фотоелектричних модулів у локальну мережу підприємства.

Ефективність такої системи значною мірою визначається алгоритмом розподілу потужності між сонячною електростанцією та генератором. У денний період основну частину навантаження доцільно покладати на фотоелектричну генерацію, тоді як генератор компенсує дефіцит потужності та забезпечує стабілізацію режиму. При цьому важливо підтримувати навантаження генератора не нижче 25–30 % його номінальної потужності, оскільки саме в цій зоні забезпечуються прийнятні паливна ефективність і надійність роботи.

На рисунку показаний добовий графік використання електроенергії підприємством у разі втрати загальної електромережі, з постійною миттєвою потужністю 60 кВт. Зелена лінія – постійне навантаження 60 кВт, жовта – PV-генерація (пік 45 кВт опівдні), червона – вихід генератора. Бачимо, що вночі та зранку / ввечері двигун працює наповну (60 кВт), вдень – тримається в коридорі 18–40 кВт, не опускаючись нижче 30 % від номіналу. Це мінімізує витрати палива й зберігає ресурс двигуна. Отже, стабільність частоти забезпечується синхронізацією інвертора з хвилею, утвореною генератором. Для оцінки ефективності було розглянуто кілька варіантів резервного електропостачання промислового споживача: базовий дизельний генератор, мережева СЕС з дизельним генератором та мережева СЕС з газовим генератором. Результати показали, що підключення сонячної електростанції до резервної схеми саме

по собі суттєво знижує витрати палива та викиди, однак найкращі показники досягаються при використанні газового генератора. Для такої конфігурації нормована собівартість електроенергії знижується до 0,122 євро/кВт·год проти 0,246 євро/кВт·год у базовій дизельній схемі, а NPC (net present cost) — теперішня вартість усіх грошових потоків за строк служби зменшується з 9,48 до 4,92 млн євро. Одночасно річні викиди CO₂ скорочуються з 2165 до 1005 т при використанні газогенератора, а строк простої окупності становить близько 4,3 року. Отримані результати пояснюються тим, що газовий генератор має нижчу вартість палива та кращі екологічні характеристики порівняно з дизельним. За роботи разом із мережею фотоелектричної генерації це дозволяє не лише знизити собівартість кіловат-години, а й підвищити загальну ефективність системи електропостачання підприємства. Особливо ефективною така схема є для споживачів із відносно сталим графіком навантаження та тривалими денними режимами роботи, коли сонячна електростанція може покривати істотну частину попиту.

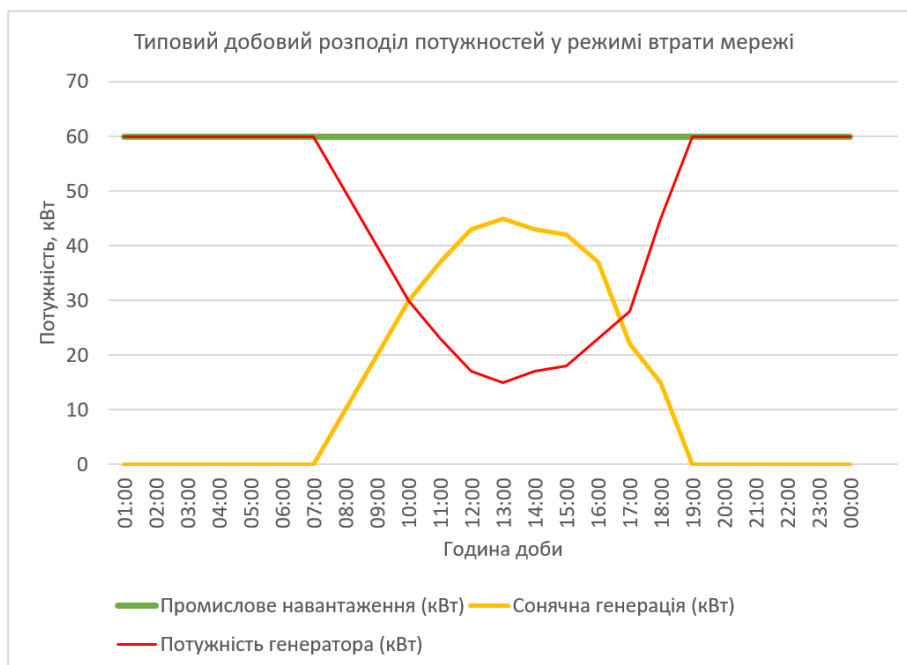


Рисунок 1. Типовий добовий розподіл потужностей у режимі втрати мережі

Висновок:

Підвищення ефективності мережевих сонячних електростанцій при роботі з генератором в автономному режимі досягається за рахунок узгодженої роботи мережевого інвертора, системи обмеження потужності та правильно підбраного резервного джерела. Найбільш доцільним для промислових підприємств є використання газового генератора, який у поєднанні з мережею фотоелектричної генерації забезпечує зниження собівартості електроенергії майже вдвічі, скорочення сумарних витрат протягом життєвого циклу системи та істотне зменшення викидів вуглекислого газу. Це підтверджує перспективність застосування таких рішень для підвищення енергетичної стійкості та екологічної ефективності підприємств.

ПОСИЛАННЯ

- Kougias I., Szabó S. Energy management and optimisation of PV/diesel/battery hybrid systems using load-following and cycle-charging dispatch. *Sustainability*. 2019. Vol. 11, No. 3. P. 683. DOI: 10.3390/su11030683.
- Al-Rashidi M., Darwish M. Design, techno-economic feasibility analysis, and sensitivity study of PV/GG/BESS microgrids for industrial facilities. *Renewable Energy*. 2025. Vol. 214. 120024. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120024.
- Deye. *SUN-40/45/50K-G04 grid-connected PV inverter: User manual* (ver. 2.5). Ningbo Deye Inverter Technology Co., 2025.
- Deye. *Zero-export function and smart-meter wiring – Section 7, SUN-50K-G04 manual*. Ningbo Deye, 2025.
- HOMER Energy. *Levelized cost of energy calculation – HOMER Pro help*. 2025
- Generac Industrial Power. *Total cost of ownership: Diesel vs. natural-gas generators*. Technical brief. 2023.
- Zhang L., Li Y., Chen M. Grid-forming control for inverter-based resources in power systems. *IET Renewable Power Generation*. 2023. Vol. 17, No. 5. P. 1071–1084. DOI: 10.1049/rpg2.12991.
- Husein M. et al. Decarbonising a solar PV and gas turbine microgrid with hydrogen blending. *Energy*. 2023.

STUDY OF SERIES AND PARALLEL CONNECTION OF SOLAR CELLS USING THE LEXSOLAR LABORATORY EQUIPMENT KIT

Mirzaalimov A.A

Andijan State Pedagogical Institute, Andijan, Uzbekistan, 170100

phone: (998) 97 273-48-08, e-mail: avazbek.mirzaalimov@mail.ru

This study investigates the series and parallel connections of solar cells using the LexSolar PV Professional laboratory kit in higher education. The experimental approach combines demonstrational and hands-on methods to enhance students' understanding of photovoltaic systems. Solar cells with identical parameters were connected in both series and parallel configurations, and their performance was evaluated using a motor module under constant illumination conditions. The results show that the series connection increases voltage while maintaining constant current, whereas the parallel connection increases current with nearly constant voltage. These differences significantly influence the operation of the load. The study demonstrates that laboratory-based teaching methods improve students' practical skills and conceptual understanding of solar energy systems.

Key words: Photovoltaics, solar cell, series connection, parallel connection, LexSolar, laboratory experiment.

ORCID: 0000-0003-2846-1901

I. Introduction

In higher education institutions, several modern methodological approaches exist for teaching the subject of solar energy using the LexSolar PV Professional laboratory equipment kit. Within this approach, students are able to study the subject through both demonstrational and experimental methods [1].

Photovoltaics is the direct conversion of solar radiation into electrical current. This conversion can be achieved using solar cells. The light incident on a solar panel is converted into electrical energy [2]. The greater the intensity of light falling on a solar cell, the greater the amount of electrical energy that can be generated. Therefore, the amount of produced energy depends on the intensity of the incident radiation. Due to seasonal changes and varying weather conditions, the intensity of solar radiation differs, which leads to variations in energy production.

Compared to other methods of electricity generation (for example, thermal power plants operating on conventional non-renewable fuels such as coal or natural gas), one of the main advantages of solar panels is their ability to produce environmentally friendly electrical energy.

Solar cells have two terminals: a negative “–” terminal on one side and a positive “+” terminal on the other. These symbols indicate the polarity of the solar cells. Similar to batteries, correct identification of polarity is essential when working with solar cells and photovoltaic panels.

The LexSolar PV Professional laboratory equipment kit includes 11 sections and 33 experimental tasks dedicated to the study of solar energy, solar cells, photovoltaic modules, and power systems.

In studying the series and parallel connection of solar cells using the LexSolar laboratory equipment kit, the following connection schemes and components required for assembling solar cell circuits are primarily used.

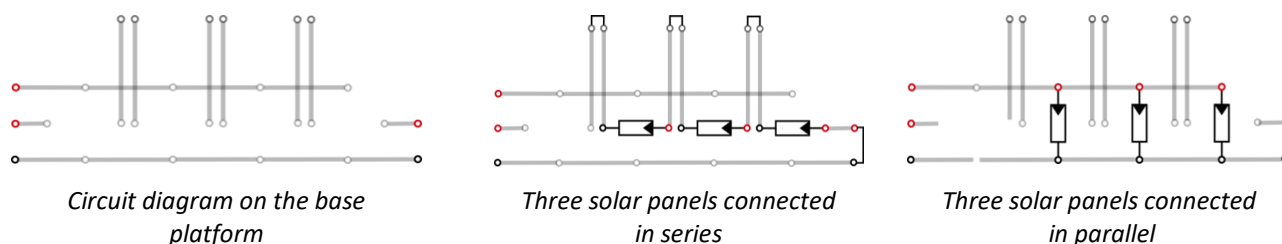


Figure 1. Circuits of solar cells connected in series and parallel.

Using the LexSolar PV Professional kit, the difference between series and parallel connected solar panels can be investigated with the help of a motor module.

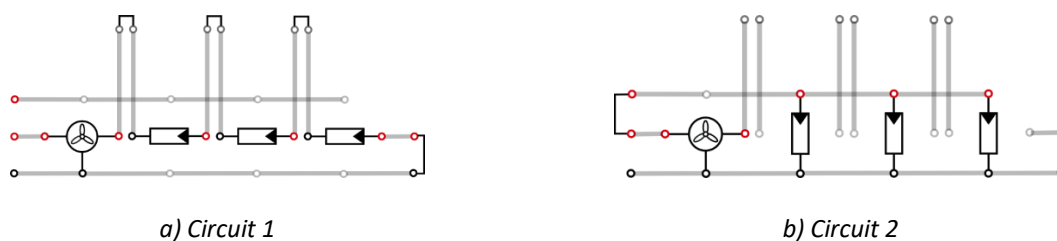


Figure 2. Experimental circuits for investigating the difference between series and parallel connected solar cells using a motor module.

In Circuit 1, the motor module is connected to three solar cells with photoelectric parameters of $I = 420 \text{ mA}$ and $U = 0.5 \text{ V}$ arranged in a series configuration. In Circuit 2, the motor module is connected to three solar cells with the same parameters arranged in a parallel configuration.

Accordingly, the experimental tasks are divided into two parts:

1. Assemble the series-connected circuit (Circuit 1). First, use one solar panel, then the second, and finally the third, recording your observations at each stage.
2. Assemble the parallel-connected circuit (Circuit 2). Similarly, use one, then two, and finally three solar panels, recording your observations.

Note: During the experiment, the test conditions (illumination) must remain constant.

The experimental results are recorded in a table. Based on the obtained results and observations of the motor rotation speed, students draw conclusions. This process enhances and strengthens students' understanding when teaching solar energy using modern methodological approaches.

Conclusion. The study confirms that the electrical performance of solar cells significantly depends on their connection type. Series connection increases voltage, while parallel connection enhances current output, which directly affects the operation of the load. The use of the LexSolar PV Professional laboratory kit in the educational process proved to be effective in strengthening students' theoretical knowledge and practical skills through experimental learning.

REFERENCES

1. <http://www.lexsolar.de/>
2. B.D.Rashidov Quyosh energetikasi. O'quv qo'llanma. "Omadbek print number one" MCHJ. Andijon 2025. 129 bet.

STUDY OF THE DEPENDENCE OF SOLAR CELL POWER ON ITS SURFACE AREA USING THE LEXSOLAR LABORATORY EQUIPMENT KIT

Mirzaalimov A.A

Andijan State Pedagogical Institute, Andijan, Uzbekistan, 170100

phone: (998) 97 273-48-08, e-mail: avazbek.mirzaalimov@mail.ru

This study investigates the effect of active surface area on the power output of a solar cell using the LexSolar PV Professional laboratory kit. The experimental method is based on partially covering the solar cell surface to vary the effective illuminated area under constant illumination conditions. The open-circuit voltage and short-circuit current were measured for different coverage levels. The results show that a decrease in the active surface area leads to a significant reduction in current and output power, while the voltage changes only slightly. The study demonstrates the importance of surface area in photovoltaic performance and highlights the effectiveness of laboratory-based learning in solar energy education.

Key words: Photovoltaics, solar cell, surface area, output power, LexSolar, laboratory experiment.

ORCID: 0000-0003-2846-1901

Solar energy stands out among renewable energy sources due to its environmental friendliness, long-term sustainability, and wide applicability. Improving the efficiency of solar cells and evaluating their energy performance under real operating conditions are among the most relevant issues in modern physics and alternative energy research [1]. In particular, studying the dependence of the power generated by a solar cell on its active surface area allows for a deeper understanding of photovoltaic energy conversion processes [2].

The power of a solar cell depends directly on several factors, including illumination intensity, temperature, material properties, and the geometric dimensions of the active surface [3]. As the active surface area increases, the amount of absorbed solar radiation also increases, leading to higher generated current and overall power output. Therefore, determining the variation of power with respect to surface area under laboratory conditions has significant scientific and practical importance.

In this study, the dependence of solar cell power on its surface area is experimentally investigated using the LexSolar laboratory equipment kit. With the help of this system, the electrical output parameters of the solar cell are measured under controlled conditions, and the effect of surface area on power generation is analyzed based on the obtained results. The findings of this study contribute to the development of practical skills in the educational process and serve as a scientific basis for designing low-power photovoltaic systems.

The LexSolar PV Professional laboratory equipment kit includes 11 sections and 33 experimental tasks dedicated to the study of solar energy, solar cells, photovoltaic modules, and systems.

In studying the dependence of solar cell power on its surface area using the LexSolar laboratory equipment kit, the following connection schemes and components required for assembling solar cell circuits are primarily used.



Required equipment:

- Base platform
- 1 Large solar panel
- 1 AV-Modul
- Cover for solar panels

Figure 1. AV module and a circuit mounted on the base platform with a solar cell.

In Circuit 1, the effect on the photoelectric parameters is studied by covering the surface of a solar cell ($I = 840 \text{ mA}$, $U = 0.5 \text{ V}$) with square masks using the AV module.

Accordingly, the experimental tasks are divided into two parts and defined as follows:

1. Measure the open-circuit voltage and short-circuit current sequentially.
2. Repeat the measurements by covering 1/4, 1/2, and 3/4 of the solar cell surface.
3. Record all measured data in a table.

The experimental results are documented in tabular form. Based on the obtained results, students analyze the variation of the photoelectric parameters of the solar cell and draw conclusions. This process enhances and strengthens students' understanding when teaching solar energy through modern methodological approaches.

Discussion. The experimental results show that the electrical output of the solar cell is strongly dependent on its active surface area. As the covered portion of the cell increases, the effective illuminated area decreases, leading to a reduction in generated photocurrent. Since the output power is directly related to both current and voltage, the decrease in current results in a noticeable reduction in power.

It was observed that the short-circuit current is highly sensitive to changes in the illuminated surface area, while the open-circuit voltage exhibits only minor variations. This behavior is consistent with the fundamental principles of photovoltaic operation, where the photocurrent is proportional to the incident light and active area, whereas the voltage depends logarithmically on the generated current.

The findings confirm that partial shading or reduction of the active surface significantly affects the performance of solar cells. Therefore, optimizing the effective surface area and minimizing shading are crucial factors in improving photovoltaic system efficiency.

Conclusion. The study demonstrated that the output power and photoelectric parameters of a solar cell strongly depend on its active surface area. As the covered area increases, the generated current and power decrease proportionally, while the voltage shows relatively smaller variation. The experimental results obtained using the LexSolar PV Professional laboratory kit confirm the theoretical relationship between surface area and photovoltaic performance. This laboratory-based approach effectively enhances students' practical skills and deepens their understanding of solar energy systems.

REFERENCES

1. <http://www.lexsolar.de/>
2. N. Mirzaalimov. Noan'anaviy energiya manbalari. [o'quv qo'llanma]—"Omadbek print number one" MCHJ. Andijon: 2024. – 210 b.
3. B.D.Rashidov Quyosh energetikasi. O'quv qo'llanma. "Omadbek print number one" MCHJ. Andijon 2025. 129 bet.

ULTRASONIC SURFACE TREATMENT OF SILICON WAFERS FOR PHOTOVOLTAICS

Aliev R. ^{1*}, Alinazarova M. ², Mirzaalimov N. ¹

¹ Andijan State University, 129 University str., Andijan, Uzbekistan, 170100

² Namangan State University, 161 Boburshox str., Namangan, Uzbekistan, 160119

Annotation: *An experimental setup for ultrasonic treatment of the surface of silicon wafers has been developed. Experimental ultrasonic treatment (UST) of silicon wafers resulted in a 1.54-fold increase in charge carrier lifetime. The obtained results, along with the physical substantiation of light absorption processes in wafers subjected to surface UST, and changes in the lifetime of photogenerated charge carriers, allow us to recommend a new method for increasing the efficiency of silicon photovoltaic converters.*

Key words: *Silicon, photovoltaic converter, ultrasonic treatment, charge carrier, lifetime.*

ORCID: ^{1*} 10000-0002-7375-727X; ² 0009-0006-5136-5589; ¹ 0000-0002-9264-3710

Among the various renewable energy devices, solar photovoltaic power plants (SPPPs) are the most promising for land-based energy generation. Almost all existing SPPPs are based on silicon solar cells [1], and their optical efficiency is one of the most important parameters. This article provides a review of the state of research on the use of ultrasonic processing (USP) to improve the surface properties of semiconductor materials, particularly silicon wafers, intended for the creation of solar photovoltaic converters (PVCs). One of the most promising areas for the development of modern high-efficiency single-junction solar cells is the introduction of fundamentally new materials with nano-heterostructures containing quantum dots (QDs). The absorption properties of such structures, both short-wavelength and long-wavelength solar radiation, demonstrate the feasibility of exploiting quantum-size effects to achieve high solar cell photovoltaic conversion efficiency. Optimal materials for their fabrication and the operating principles of high-efficiency solar cells based on them are also considered. The prospects of fabricating nano-heteroepitaxial structures with QDs using liquid-phase epitaxy with pulsed substrate cooling are scientifically substantiated [1]. Currently, more than 85% of solar cells used in various sectors of the economy are made on the basis of crystalline silicon, and the optical properties of the surface of such materials determine the overall efficiency of solar cells [2].

Various technical methods are used to improve the optical properties of silicon surfaces. One simple method involves applying an antireflective coating (ARC) made of various dielectric oxide materials to the surface. By creating a texture on the surface and applying the ARC, improved efficiency can be achieved [3].

Therefore, research into improving the optical properties of silicon wafers is relevant. This work focuses on a new method for texturing silicon surfaces. Ultrasonic treatment (UST) was used to treat the surface of silicon intended for solar cell manufacturing. Single-crystal p-type silicon wafers were used in the experiments. Ultrasonic treatment of the silicon wafer surface was performed using a specialized device comprising the following components: mechanical action unit; air pressure regulation system; vibrator; mechanical vibration transmission working cylinders; spherical microprobe; pressure transmission channel; compressor; ultrasonic frequency generator. During the study, the surface roughness and reflectivity were measured as functions of the incident light wavelength before and after the RCD. The charge carrier lifetime was also measured before and after the RCD.

We note new trends in the development of semiconductor photovoltaics. For example, materials scientists at the Australian National University have proposed new properties of silicon for the creation of low-cost solar cell technology [4]. Anisotropic deformation of the crystal lattice can impart new properties to the semiconductor, allowing for an expansion of its spectral photosensitivity. Therefore, the authors believe it would be beneficial to develop a new technology for producing strained silicon to create low-cost and highly efficient solar cells.

In [5], a method for increasing the efficiency of solar cells is proposed by applying local pressure to semiconductor crystals when illuminated with optical light of a specific wavelength. Local pressure on the crystal surface results in the development of a mechanical stress gradient within it, and, consequently, a new flexophotovoltaic effect is observed. Based on the crystallographic concepts of semiconductor materials, it can be assumed that such an effect can also be observed in silicon. If a p-n junction is formed, the sensitivity of such a structure significantly exceeds that of a resistor structure. A targeted study of the influence of local mechanical stress on the photoelectric conversion process in silicon structures with a p-n junction is essential. From a physical perspective, in materials with a crystalline structure lacking central symmetry, photogenerated electrons can have different mobilities for different crystallographic orientations [5]. This results in an anomalous photovoltaic effect, which can be used to convert light energy into electric current. With the

correct orientation of the p-n junction front relative to the direction of the local crystal voltage, the efficiency of the solar cell can be increased due to the anomalous photovoltaic effect.

Table 1. Results of measuring the lifetime of nonequilibrium charge carriers in silicon before and after UST

Silicon wafer thickness, μm	Nonequilibrium charge carrier lifetime, μs		
	Original sample	After UST	Back surface after UST, μs
200	0.88	0.96	0.94
203	0.7	0.68	0.71
270	1.79	1.25	1.92
275	5.7	8.76	6.55
280	x	x	x
340	3.8	x	0.96
380	2.14	3.81	2.19
460	4.82	2.28	6.05

Local deformation of the illuminated surface of a semiconductor crystal leads to polarization, which induces a flexoelectric effect due to the generation of a mechanical stress gradient. Deforming the crystal surface using a microindentation needle with a force of up to 15 micronewtons and irradiation with 405 nm laser pulses resulted in an increase in photocurrent of nearly two orders of magnitude. To maximize the bulk lifetime of the semiconductor crystal, an optimal dopant concentration in the base is selected, minimizing the density of defects of various origins [6]. Experimental ultrasonic treatment of silicon wafers resulted in a 1.54-fold increase in the zero-charge lifetime. The obtained results, along with the physical justification for light absorption processes in wafers subjected to surface ultrasonic treatment, and the change in the lifetime of photogenerated zero-charges, allow us to recommend a new method for increasing the efficiency of silicon solar cells. Further determination of more precise ultrasonic treatment modes for silicon surfaces will facilitate the practical application of the proposed method in the industrial production of silicon solar cells.

REFERENCES

1. S.Zaynabidinov, R. Aliyev, M. Muydinova Osobennosti pogloshcheniya izlucheniya v kremnii s poverkhnostnoy teksturoy i yego vliyaniye na svoystva fotoelektricheskikh preobrazovateley. // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» (ISJAEE). – 2019. – № 28–33. – S. 312–317.
2. B.A.Nikitin, V.A.Gusarov Eksperimental'naya otsenka koeffitsiyenta otrazheniya kremniyevykh fotoelektricheskikh preobrazovateley. // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» (ISJAEE). –2016. – T. 7–8. – S. 12–18; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.07-08.012-018>.
3. D.A.Lizunkova Issledovaniye elektricheskikh i opticheskikh svoystv fotochuvstvitel'nykh struktur na nanostrukturirovannom kremnii. Dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 01.04.10 – Semiconductor Physics. Samara, 2018. – 150 p.
4. Mark Garlick. Flexo-photovoltaic effect. Science. – 2018. – Vol. 360. – Iss. 6391. – P. 904–907 [Электронный ресурс]; DOI: 10.1126/Science. aan3256. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2018/04/20/flexo-photovoltaic-effect>. – (Дата обращения: 25.05.2018).
5. M.-M.Yang, D.J.Kim, M.Alexe New type of silicon promises cheaper solar technology. // Physical Review Letters, Apr., 24, 2019. <https://phys.org/news/2019-04-silicon-cheaper-solar-technology.html>.
6. R. Aliyev, B. Urmanov, M. Muydinova, Zh. Kakharov. Stimulation of the charge carrier lifetime due to the flexoelectric effect on the silicon surface. // Proceedings of the IV International Conference on "Optical and Photoelectric Phenomena in Semiconductor Micro- and Nanostructures" Fergana Polytechnic Institute, May 26–27, 2018, Fergana. – 2018. – pp. 277–279.

OPERATION OF THE BACKUP PV PLANT UNDER VARIOUS SCHEDULES OF POWER OUTAGES

O. Gaevskii¹, V. Budko², O. Doroshenko³

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, Kyiv, Ukraine;

Institute for renewable energy NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Phone: +380 97 5704643j, e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

This study investigates the operation of a grid-connected PV plant acting as a backup power source during periodic grid disconnections. The relative duration of daily power interruptions is characterized by the outage density (OD) parameter. Based on monitoring data and daily energy balance equations, we determined the dependence of the required nominal capacity of the energy storage unit on OD at various battery charging power levels. Results show that as OD increases, the required battery capacity grows following a near-exponential function.

Keywords: backup PV plant, grid disconnection, outage density, solar radiation intermittency, energy balance, battery energy storage system (BESS), charging power.

ORCID: 0000-0001-6144-2441¹; 0000-0002-6219-4221²; 0009-0007-0849-020X³

Power outages in electrical grids pose a serious and widespread challenge for many sectors of modern society: large-scale industry, small businesses, households, and critical infrastructure facilities, including hospitals, transportation, and communications [1, 2]. In Ukraine, scheduled and unscheduled grid disconnections occur systematically under wartime conditions, as military attacks target critical energy infrastructure.

Optimizing the sizing of PV plants and BESS operating in microgrids under grid disconnection conditions is a highly relevant problem [3]. In study [4], a method for sizing a backup PV plant under periodic disconnections was proposed based on balance equations for generation, storage, and consumption during the most unfavorable periods, alongside estimates of the LOLP reliability parameter as a function of OD.

This study examines a grid-connected PV plant with a battery energy storage system (BESS) operating in backup mode. The main objective is to determine the dependence of the required BESS capacity on OD across different operation scenarios. The investigated backup power system consists of four bifacial photovoltaic modules (total capacity 2.8 kW), a single-phase 5 kW inverter, a 10 kWh BESS unit, and a Battery Management System (BMS). Figure 1 illustrates the monitoring data for the plant's operation at a constant load of 0.96 kW during a summer day with an outage density of $D = 0.625$.

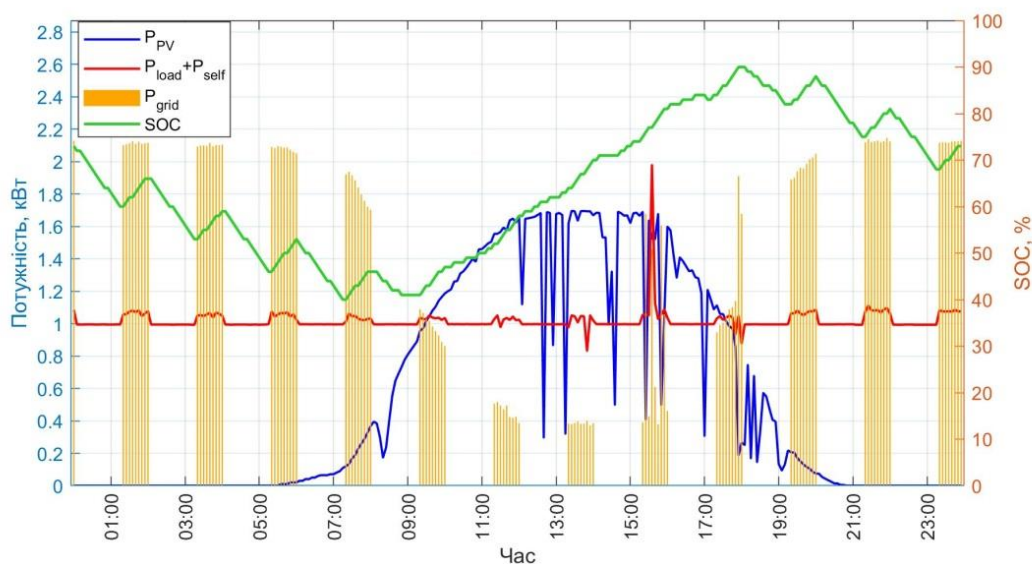


Fig. 1. Monitoring data during a day of backup PV plant operation at a constant load of $P_{load} = 0.96$ kW with outage period $\tau = 2$ h, $d = 0.625$: P_{PV} – power at the inverter input (blue curve), P_{grid} – grid power for battery charging (orange bars), $P_{load} + P_{self}$ – total load power and self-consumption of the equipment (red curve), SOC – battery state of charge (green curve)

By solving the energy balance equation, we determined the relationship between the attainable OD and the daily energy deficit that must be covered by the grid. This relationship is best represented graphically (see Fig. 2) based on monitoring data from the backup PV plant inverter. Each data point (D, e_{deficit}) corresponds to an experimental day with a specific OD value. A linear regression (blue line) fitted to the experimental data shows a strong correlation, with a RMSE = 0.057 and a coefficient of determination $R^2 = 0.814$.

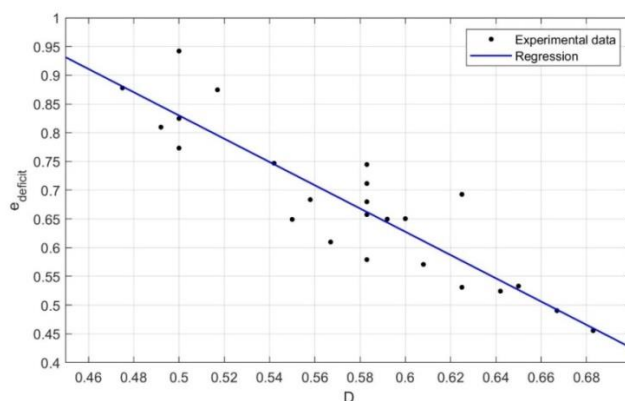


Fig.2. Dependence of the daily energy deficit required to meet the load demand on OD (змінна D) for different observation days at a battery charging power of 1 kW.

When calculating battery capacity of BESS, both the outage factor and solar radiation intermittency must be considered. The capacity must be sufficient to bridge generation dips. Since the battery smooths out hourly generation fluctuations for the consumer, the daily output in the simulation was calculated using a 7-day Moving Average (MA).

Experiments with a BESS equipped with a monitoring system allow for varying the battery charging current, enabling power supply to the consumer even at high OD values. The simulation results yielded dependencies of the required battery capacity on OD at different charging rates. The family of curves for nominal battery energy in Fig. 3 demonstrates exponential growth in required capacity as OD increases.

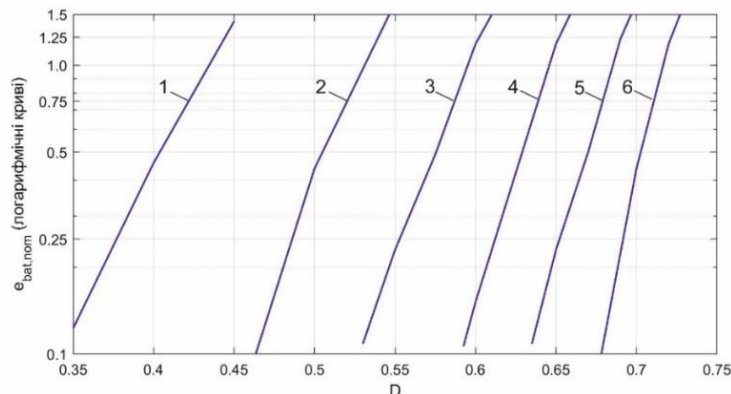


Fig. 7. Family of curves for the required nominal battery energy $e_{\text{bat,nom}}(D)$ versus OD at different charging powers: 1 – $p_{\text{ch}} = 1$; 2 – $p_{\text{ch}} = 1.2$; 3 – $p_{\text{ch}} = 1.4$; 4 – $p_{\text{ch}} = 1.6$; 5 – $p_{\text{ch}} = 1.8$; 6 – $p_{\text{ch}} = 2.0$

REFERENCES

1. Salman H.M., Pasupuleti J., Sabry A.H. Review on Causes of Power Outages and Their Occurrence: Mitigation Strategies // Sustainability. – 2023. – Vol. 15. – Article 15001, <https://doi.org/10.3390/su152015001>.
2. Borujeni M.S., Ofetotse E.L., Nebel J.-C. A solar backup system to provide reliable energy in presence of unplanned power outages // Journal of Energy Storage. 2022. – Vol. 47. – Article 103653, <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103653>
3. Gupta Y., Vaidya R., Kumar H.S.V.S.N., Kamalasadan S., Doolla S. Optimal PV - Battery Sizing for Residential and Commercial Loads Considering Grid Outages // IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy, PESGRE. – 2020. – Article 9070371, <https://doi.org/10.1109/PESGRE45664.2020.9070371>.

4. Gaevsky O.Yu., Gayevska G.M., Ivanchuk V.Yu. Backup PV plant under conditions of periodic disconnections of consumers from the power grid // Vidnovlyuvana Energetica. –2023. – No.1(72). – P. 27-36, [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1\(72\)27-36](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2023.1(72)27-36).

THE ROLE OF FREQUENCY DISTRIBUTION TYPE OF INSOLATION FLUCTUATIONS IN PHOTOVOLTAIC POWER PLANT CALCULATIONS

O. Gaevskii¹, H.M. Gaevska²

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

Institute for renewable energy NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Phone: +380 97 5704643i, e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

This paper compares two types of synthetic daily insolation series: with normally distributed fluctuations (residuals) and with a typical asymmetric (non-Gaussian) distribution. The generation of synthetic series was performed using the probability integral transform method based on a first-order autoregressive model. The input data used was the frequency distribution of residuals X of the clearness index, obtained by analyzing multi-year meteorological data. The analysis of the two types of series showed that the typical asymmetric distribution of residuals leads to higher PSH values compared to the normal distribution. This finding is important for PV plant sizing and required battery capacity estimation, as well as for the assessment of energy supply reliability, which is significantly affected by the stochasticity of solar radiation.

Key words: *synthetic series of insolation, autoregressive model, clearness index, stochastic non-Gaussian residuals, probability integral transform, PSH, SOC*

ORCID: ¹0000-0001-6144-2441; ²0000-0001-7760-6789.

Typically, when optimizing the component composition of PV systems, the available input data are limited in scope: monthly average radiation values or a 1-year meteorological series for typical meteorological year conditions [1]. In calculations of various types of PV systems, it is necessary to account for the probabilistic nature of radiation conditions that may occur during operation, which is possible through stochastic photogeneration models and synthetic insolation series [2 - 4].

This work employs a method for generating synthetic series of daily insolation based on the frequency distribution of stochastic insolation fluctuations relative to daily average values, previously obtained by analyzing multi-year meteorological observation data. This refers to a standardized (season-independent) daily irradiation series (Amato et al. model [4]), which offers an advantage in estimation calculations due to the use of a single distribution for all possible atmospheric states.

In repeated modeling, we operate with peak sun hours $PSH(n,j)$, where n ($n=1,..N$) is the observation day number, j ($j=1,..J$) is the model run (simulation) number. The random variable $PSH(n,j)$ is represented as

$$PSH(n, j) = k_t(n, j)G_0(n)/1000 \quad , \quad (1)$$

where $G_0(n)$ is the extraterrestrial irradiation sum (Wh/m^2), $k_t(n,j)$ is the clearness index (< 1). The latter is represented as the sum of the daily average value $\mu(n)$, obtained by averaging over many years, and a fluctuation component proportional to the standard deviation (SD) $\sigma(n)$ [4]:

$$k_t(n, j) = \mu(n) + \sigma(n)X(n, j) \quad . \quad (2)$$

We assume that the stochastic residuals $X(n,j)$ in (2), normalized to $\sigma(n)$, form a stationary Markov process and are approximately described by a first-order autocorrelation model:

$$X(n, j) = \rho X(n - 1, j) + Y(n, j) \quad . \quad (3)$$

where ρ is the correlation coefficient, $Y(n,j)$ is the stochastic component.

In most cases, for various mid-European latitude regions, the residuals $X(n)$ have an asymmetric (non-Gaussian) frequency distribution (Fig. 1).

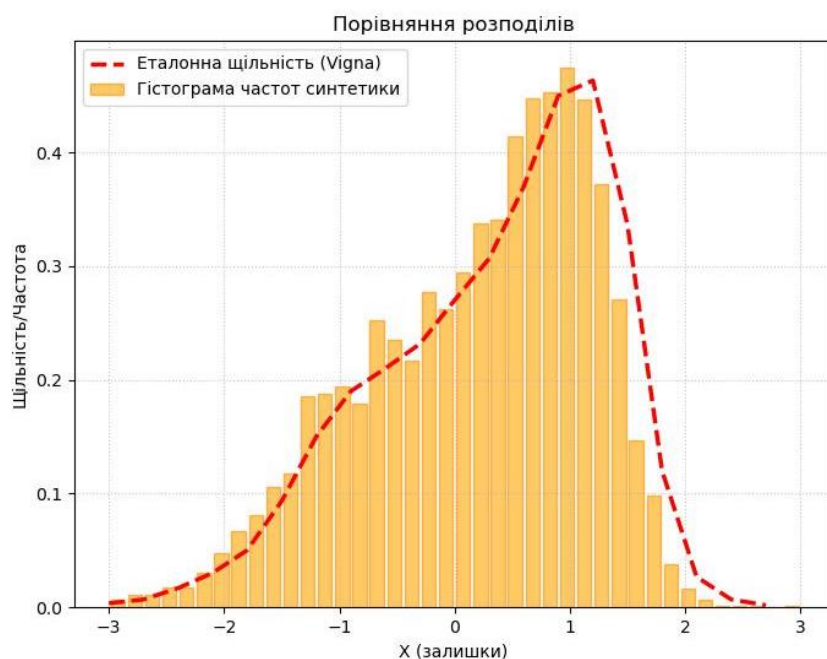


Fig. 1. Example of a typical fluctuation distribution $X(n)$ at European latitudes: interval frequency estimates of X (orange bars); actual probability density function $f(X)$ (dashed line).

To reproduce the experimentally obtained distribution when generating synthetic series, we use a method known in statistics as the probability integral transform (PIT) [4] or the distribution function inversion method. This method consists of the following steps: (1) generation of a normal stationary series with autocorrelation; (2) transformation to the standard normal cumulative distribution function; (3) obtaining the quantile function, which is the inverse of the empirical distribution function $F(X)$.

In this work, the described method was used to generate synthetic series of k_t – PSH with a typical frequency distribution of X (Vigna di Valle, Italy was chosen as an example). This distribution, shown by a dashed line in Fig. 1, was characterized by definition with $SD = 1$ (since X is normalized to the mean σ) and $\rho = 0.33$ [4]. An example simulation of such a series for the actual non-Gaussian distribution is illustrated by the histogram in Fig. 1.

The synthetic series obtained in simulations were tested for stationarity using the Dickey-Fuller test, and for distribution similarity with the actual one using the Kolmogorov-Smirnov test (p -value ranged from 0.41 to 0.47, with the similarity criterion p -value > 0.05). The series with the distribution shown in Fig. 1 has the following statistics: mean value – 0.1972, SD – 0.9742, $AR(1)$ correlation coefficient – 0.311.

Target simulations were performed for a 50-day interval (early December – second half of January) with the smallest average $\mu(n)$ – this is precisely the interval relevant for PV energy storage system calculations. In our work [3], the behavior of battery of an autonomous PV system operating with a constant load was modeled. The calculations were performed in parallel for two types of residual distributions $X(n)$ with identical σ and ρ : asymmetric, shown by the histogram in Fig. 1, and normal.

An example of SOC behavior is shown in Fig. 2a for a synthetic series with asymmetric (non-Gaussian) distribution, and in Fig. 2b – for a normal synthetic series. In both figures, blue curves represent synthetic sequences $PSH(n)$, red ones – $SOC(n)$.

In the case of non-Gaussian X (left figure) a more gradual decline in SOC was observed compared to the normal distribution. Moreover, at the end of the unfavorable period, SOC on the left graph exceeds the corresponding value obtained for the averaged profile $PSH(n) = \mu(n)$ without fluctuations. These results of synthetic series simulation analysis suggest that the battery system capacity requirements may be relaxed when accounting for real non-Gaussian frequency distributions of insolation fluctuations. The reason for this effect,

in our opinion, lies in the asymmetry of the frequency distribution of X with a positive mean value of approximately 0.2, which leads to longer intervals with $X > 0$ than intervals with $X < 0$ on the graph in Fig. 2a.

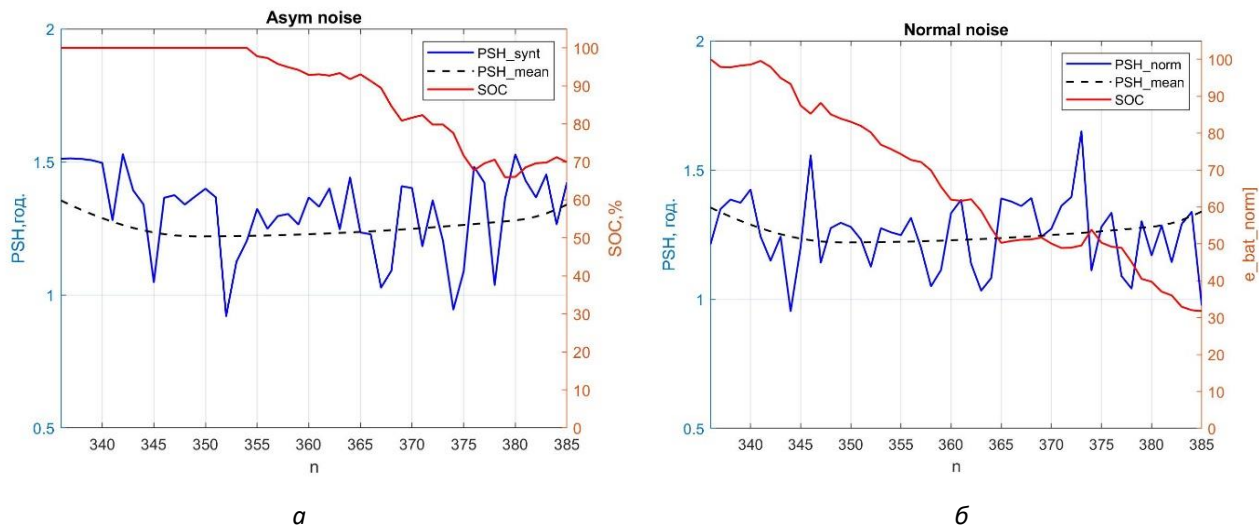


Fig. 2. Example of $SOC(n)$ profile calculation using synthetic series for a location at 42°N, 12°E (Vigna di Valle, Italy) during the period of minimum insolation over 50 days with $p_{inst} = 20$, $e_{bat,nom} = 6$ (in p.u.):
a – for X with asymmetric distribution (Fig. 1); b – for normal X .

REFERENCES

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. M. Larrañeta, C. Fernandez-Peruchena, M.A. Silva-Pérez, I. Lillo-bravo, A. Grantham, J. Boland. Generation of synthetic solar datasets for risk analysis // Solar Energy, 2019, Vol. 187, 212-225. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.05.042>
3. O. Gaevskii, H. Gaevska. A synthetic insolation series in sizing calculations of PV plants // Vidnovluvana Energetika, 2025, N 3(82), 97-106. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).97-106](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).97-106).
4. 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, Vol. 37, N3, 179-194. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(86\)90075-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(86)90075-7).

TWO CLUSTERING APPROACHES FOR GENERATING SYNTHETIC INSOLATION SERIES

O. Gaevskii¹, H.M. Gaevska²

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine;

Institute for renewable energy NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine.

Phone: +380 97 5704643i, e-mail: a.gaevskii@kpi.ua

This study presents the modeling of time series of the clearness index K_t , which are proportional to insolation. The distribution of K_t in most regions of Ukraine has a complex bimodal structure; therefore, to reproduce it, the data were separated into two clusters corresponding to cloudy and clear weather conditions. Two approaches were applied: Approach A — cluster determination using k-means with a sharp boundary; Approach B — Kernel Density Estimation (KDE) with a Markov transition matrix and an overlap region. Statistical estimates of the stochastic residuals (the K_t series cleared of the seasonal component) were obtained for constructing autoregressive moving average ARMA(1,1) models. Generation and analysis of synthetic series obtained within both approaches demonstrated, according to the Kolmogorov–Smirnov criterion, their similarity to the actual K_t series. The similarity criterion based on K_t sums in continuous runs proposed in this study favors the method of hard clustering (approach A). Analysis of distributions based on K_t sums in cloudy day runs allows assessing the reliability of power supply by photovoltaic plants.

Key words: *insolation time series, clearness index, cluster models, k-means, kernel density estimation, stochastic residuals, synthetic series, ARMA, PV plant, power supply reliability.*

ORCID: ¹0000-0001-6144-2441; ²0000-0001-7760-6789.

The key factor affecting the electricity generation by photovoltaic plants (PV plants) is insolation, which is stochastic in nature. The study of statistical regularities of insolation time series is of great importance for PV plant calculations, assessment of power supply reliability, and for electricity production planning.

In this study, actual multi-year series of daily insolation are analyzed, which are typically used for optimizing the component composition of PV plants and long-term forecasting. One of the main stages of experimental radiation data analysis is clustering, which must be performed for time series with complex frequency distribution structures. Estimation of these distribution parameters allows separating the set of days into clusters according to the measure of similarity between them, and then constructing a statistical model for each cluster. The clearness index K_t , defined as the ratio of global solar irradiance at the Earth's surface to extraterrestrial solar irradiance, is widely used for solar radiation analysis. Examples of insolation series clustering based on K_t in various countries and regions demonstrate high effectiveness when applied to forecasting tasks at different time horizons (see references in [1,2]).

In this study, 10-year series of daily insolation for the city of Kyiv (Ukraine) were analyzed using actual data from the Atmosphere Data Store (ADS) on the CAMS (Copernicus Atmosphere Monitoring Service) hub. The results of K_t calculation with the seasonal component are shown in the upper plot of Figure 1. The lower plot shows – the residual series X (K_t minus the seasonal component). The obtained residual series is stationary according to the Augmented Dickey–Fuller(ADF) test (p -value $\ll 0.001$).

Mean values are 0.466 for K_t and 0.00018 for residuals (which ideally approach zero). The standard deviation (SD) of residuals is – 0.1832. The autocorrelation (ACF) and partial autocorrelation (PACF) coefficients as a function of lag are shown in the plots of Fig. 2.

The frequency distribution for K_t obtained from actual meteorological data (Fig. 1) has a bimodal character (Fig. 3) with two maxima corresponding to cloudy and clear weather. When working with these series, two approaches were applied (from data partitioning into clusters to synthetic series generation):

- **Approach A.** Clustering of actual data using the k-means method (grouping of points into k clusters based on the principle of minimizing the SD of points outside clusters from their centers) [3]. A hard boundary between clusters is established, defined as the midpoint between cluster centers. In this study, the data were partitioned into two clusters, cloudy and clear, with individual parameters of the ARMA(1,1) model determined for each cluster. Synthetic K_t series were then generated based on these parameters.

- **Approach B.** The KDE (Kernel Density Estimation) method [4] is used. In this approach, this method estimates the probability density function of K_t , which in practice has a complex shape, and groups the data around centers determined by the k-means procedure. In addition to ARMA(1,1), the sequence of cloudy/clear states is modeled through a Markov chain. This allowed generate synthetic K_t series based on a fuzzy-boundary cluster model.

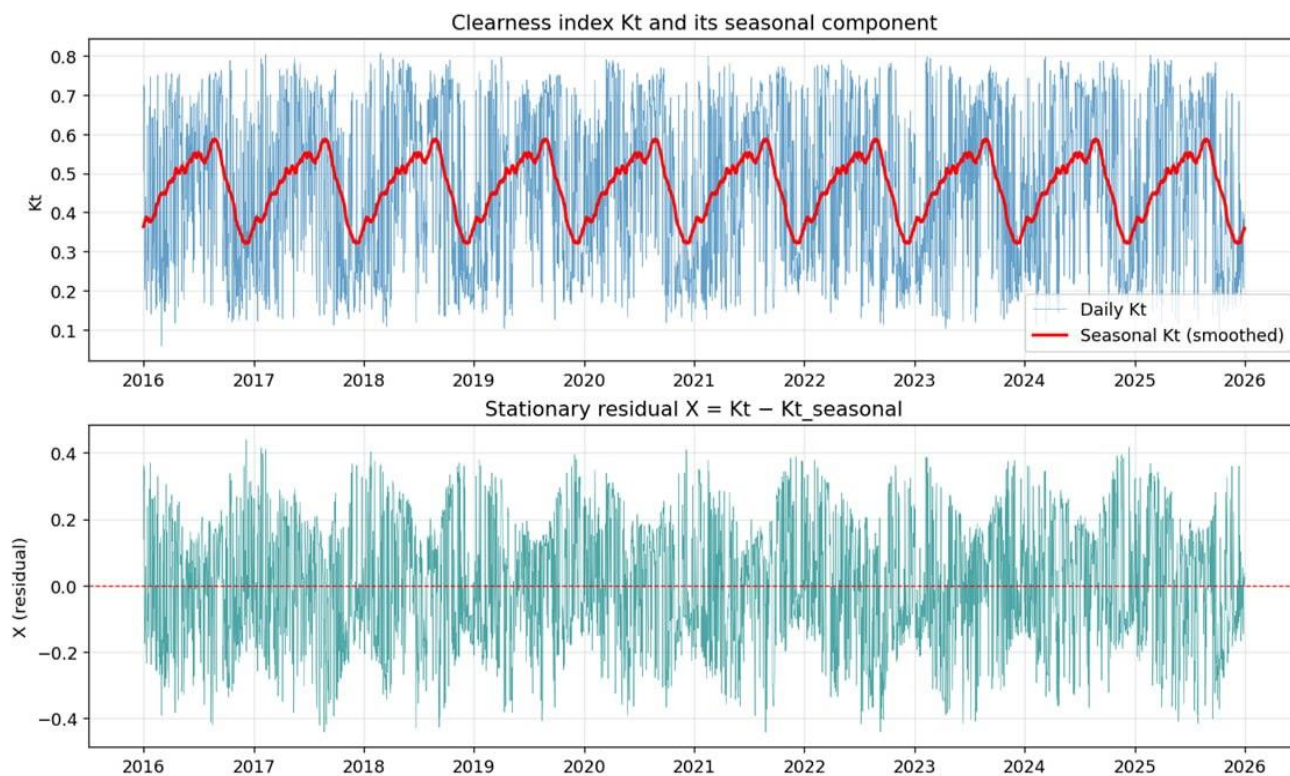


Fig. 1. 10-year series for the city of Kyiv: top – clearness index K_t with the seasonal component (red curve); bottom – residuals X (K_t cleared of the seasonal contribution)

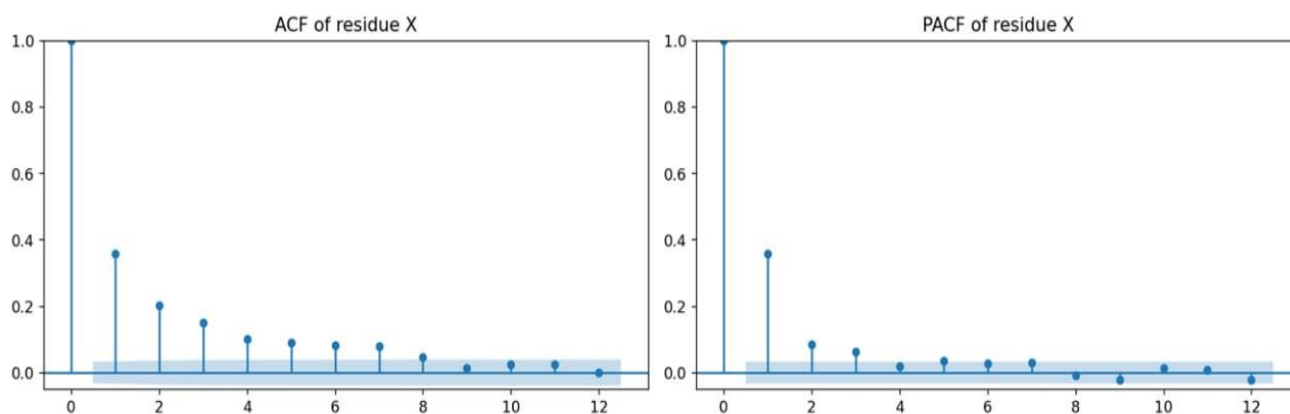


Fig. 2. Autocorrelation (ACF) (left plot) and partial autocorrelation (PACF) (right plot) coefficients of residuals X . The light blue band indicates the level of insufficiently reliable data

All synthetic series obtained within the described approaches were stationary according to the Dickey–Fuller test. The cumulative distribution function of these series satisfied the Kolmogorov–Smirnov similarity criterion with the cumulative distribution of the actual series (p -value p -value = 0.095, required > 0.05). Fig. 4 shows time series of daily K_t values with alternating continuous runs of cloudy/clear, constructed using methods of approaches A and B based on actual data (Fig. 1, top). The plots show prolonged clear runs in May–September and cloudy runs in November–December. The results of five simulations of synthetic series with clustering according to approaches A and B are displayed in the two bottom plots. Comparison of the plots shows that the actual situation is more accurately reflected by hard cluster separation (approach A).

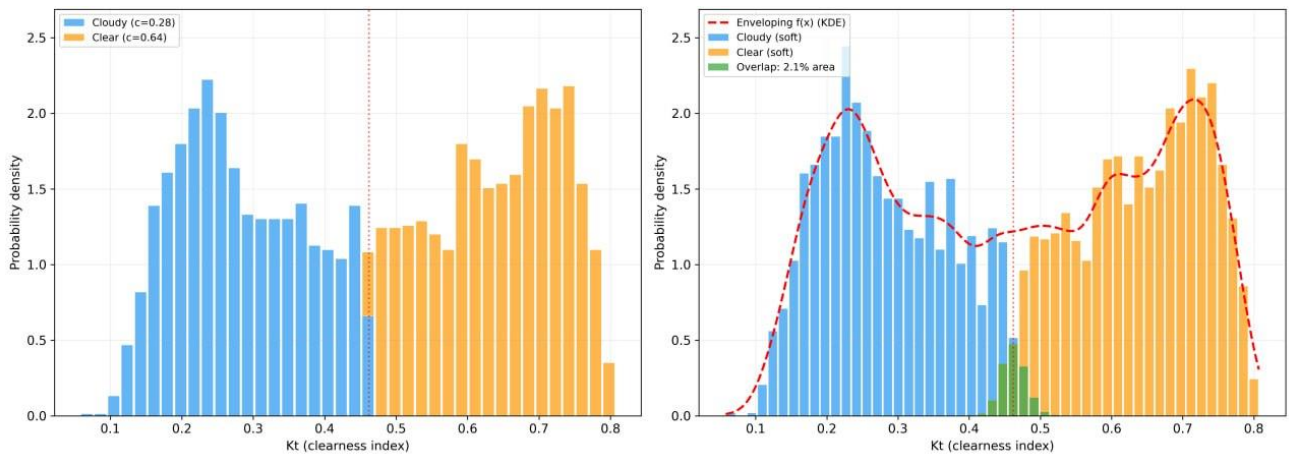


Fig. 3. Probability density distributions of the clearness index for the city of Kyiv with determination of cloudy and clear clusters: left – k-means method with a sharp boundary between clusters, cluster centers $c=0.28$, $c=0.64$; right – KDE method with Markov transitions between clusters, cluster overlap shown in green, the envelope of the overall distribution shown as a red dashed line

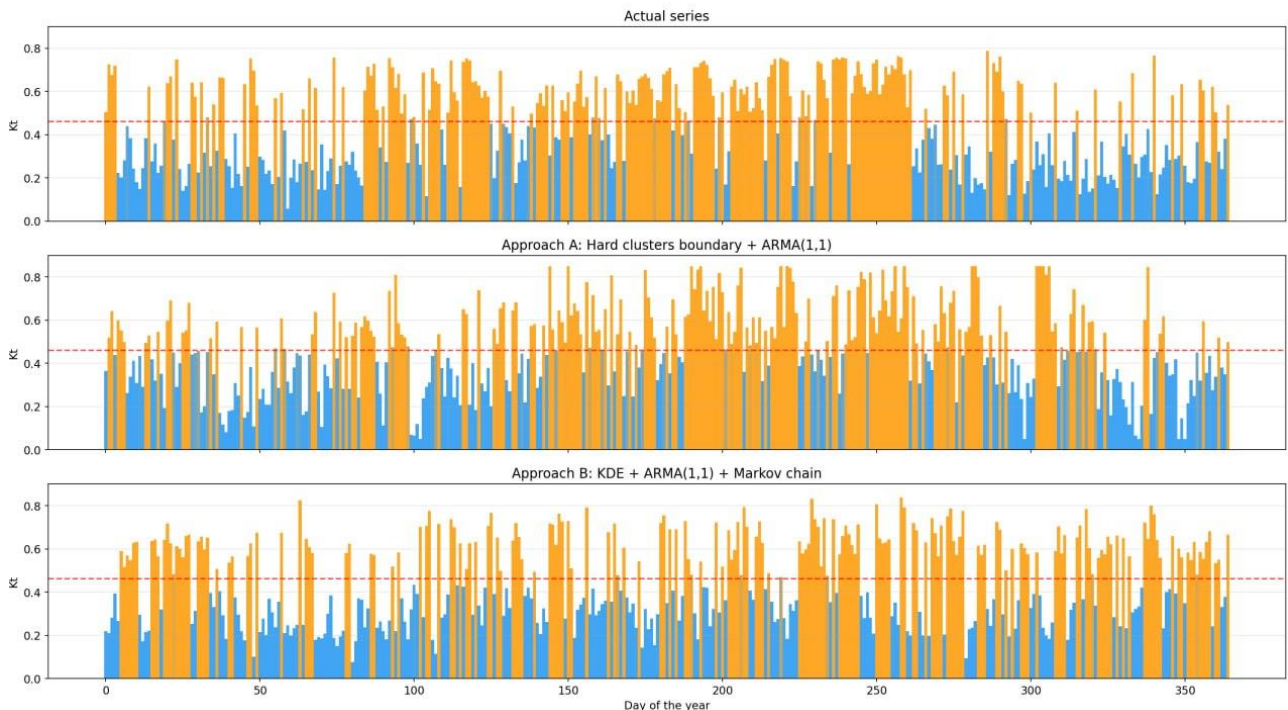


Fig. 4. Time series of K_t with alternating continuous runs of cloudy/clear: top – analysis of the actual series; middle and bottom – analysis of synthetic series obtained by methods of approaches A and B, respectively

For calculating BESS energy storage systems and the reliability of power supply by photovoltaic plants, knowledge of the duration of continuous runs of cloudy (unfavorable) days and the total insolation during these runs is important. To this end, in this study the distribution of runs by K_t sum was calculated – this sum is directly proportional to the total insolation during a continuous run. Fig. 5 shows the results of such calculation for the actual K_t series, as well as for synthetic series generated according to approaches A and B.

Conclusions. This study presents the modeling of K_t time series, which are proportional to insolation. Since the K_t distribution has a complex bimodal structure, clustering was performed using two approaches, A and B. The results of Approach A (without explicit transition modeling) showed better agreement with actual data than Approach B (incorporating a Markov chain). In our view, this is because Markov chain transitions can be overly discrete, whereas the actual physical process exhibits more complex temporal dependencies.

Simultaneously, Approach A preserves a unified autocorrelation structure with smooth transitions through the $K_t \approx 0.4$ – 0.5 zone; therefore, runs emerge organically as a consequence of the stochastic process rather than an external switch. Thus, for a bimodal distribution with $k=2$, Approach A may be sufficient and even superior for estimating the BESS capacity of stand-alone PV plants. This study proposes using the distribution of sums during continuous cloudy runs as a key metric for power supply reliability assessment (e.g., using the LPSP index).

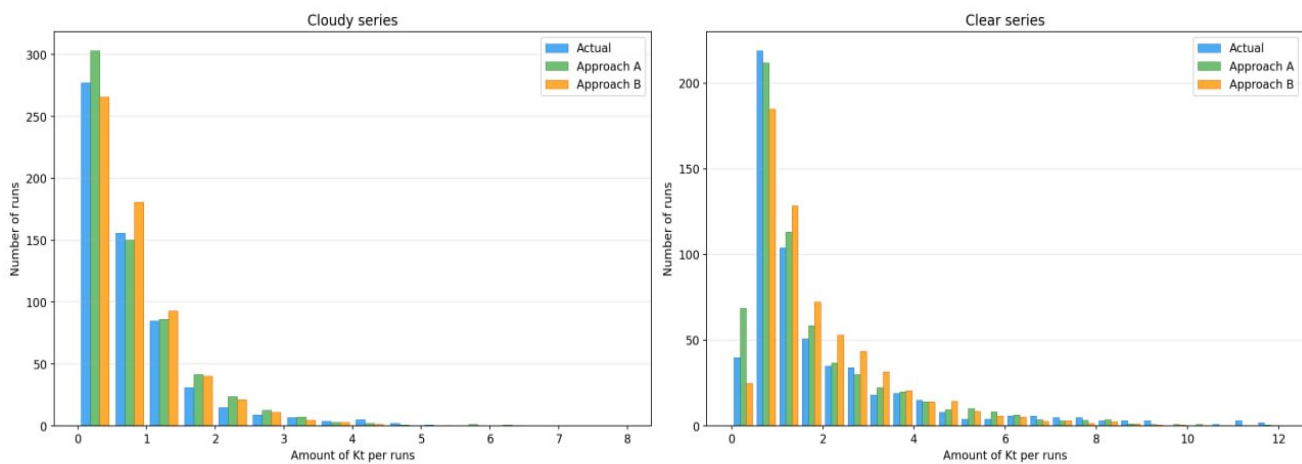


Fig. 5. Distributions of continuous K_t run sums: left – cloudy runs; right – clear runs. Results for different calculation schemes are shown by bins of the following colors: blue – actual data, green – approach A, orange – approach B

REFERENCES

1. C. Yeung, J. Wang, Y. Du et al. Clearness index cluster analysis for photovoltaic weather classification based on solar irradiation measurement data: Theory and application // *Energy* 360, 2024, Vol. 2, 100010, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.100010>.
2. G. S. Martins, M. Giesbrecht. Clearness index forecasting: A comparative study between a stochastic realization method and a machine learning algorithm // *Renewable Energy*, 2021, Vol. 180, 787-805, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.08.094>
3. R.P. Adams. K-Means Clustering and Related Algorithms // Princeton University, November 2018, <https://www.cs.princeton.edu/courses/archive/spring19/cos324/files/kmeans.pdf>.
4. Yen-Chi Chen. A Tutorial on Kernel Density Estimation and Recent Advances // *Biostatistics & Epidemiology* 1(1), April 2017, DOI: 10.1080/24709360.2017.1396742.

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОГОДНИХ ЯВИЩ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ СИСТЕМ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ УКРАЇНИ

О. В. Остапчук^{1,2}, О. В. Юраш¹

¹ Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна,

² Інститут відновлюваної енергетики НАН України
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна
тел. +38(099)4045715, e-mail: yurash.o.v.-ed51f@edu.kpi.ua

В роботі розглянуто вплив природних явищ, які класифіковано на дві групи: короткострокового та довгострокового впливу. Встановлено, що для умов України найбільш небезпечними є перегрів фотоелектричних модулів у східних та південних регіонах, ураження блискавками та вплив лісових пожеж. Запропонований підхід до оцінки ризиків дозволяє ефективніше визначати доступну потужність сонячних електростанцій в екстремальних умовах та своєчасно формувати необхідні резерви.

Ключові слова: сонячна генерація, фотоелектричні модулі, відновлювані джерела енергії, погодні явища, екстремальні температури.

ANALYSIS OF THE IMPACT OF WEATHER PHENOMENA ON THE EFFICIENCY OF SOLAR GENERATION SYSTEMS IN UKRAINE

O. Ostapchuk^{1,2}, O. Yurash¹

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Prospect Beresteyskyi, 37, Kyiv, Ukraine, 03056,

²Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
20A Hnata Hotkevicha str., Kyiv, Ukraine, 02094
tel +38(099)4045715, e-mail: yurash.o.v.-ed51f@edu.kpi.ua

The paper examines the impact of natural phenomena, which are classified into two groups: short-term and long-term effects. It is established that the most hazardous factors for Ukrainian conditions are overheating of photovoltaic modules in the eastern and southern regions, lightning strikes, and the impact of wildfires. The proposed risk assessment approach enables more accurate determination of available solar power plant capacity under extreme conditions and timely formation of the necessary reserves.

Key words: solar generation, photovoltaic modules, renewable energy sources, weather phenomena, extreme temperatures.

ORCID: ¹0000-0003-3397-2423; ²0000-0002-8607-8452.

Розвиток систем генерації з відновлюваними джерелами енергії (ВДЕ) в Україні стрімко зростає, наприклад частка найбільш поширеної сонячної генерації (СГ) в загальному енергобалансі склала 6%, а встановлена потужність сонячних електростанцій (СЕС) досягає 8 ГВт [1]. Відповідно до Національного плану дій з розвитку відновлювальної енергетики до 2030 року, КМУ передбачає збільшення встановленої потужності ВДЕ до 24 ГВт та 27% їх частки у загальному кінцевому енергоспоживанні [2]. Частка сонячної генерації планується на рівні – 12,2 ГВт встановленої потужності, тобто 50 % від усієї потужності ВДЕ. Відмічені факти вказують на пріоритетність розвитку систем СГ та актуальність досліджень на поліпшення їх умов використання. Уже сьогодні в експлуатації перебуває 1369 промислових та близько 50 тис. домашніх сонячних електростанцій [3]. Водночас СГ, як розподілений вид генерації, є вразливими до широкого спектру погодних явищ, кількісна оцінка яких є необхідною умовою коректного оперативного планування [4].

На основі проведеного аналізу було встановлено, що різні погодні явища мають принципово різний вплив на елементи СГ залежно від характеру взаємодії: одні спричиняють короткострокове зниження рівня генерації з поступовим подальшим відновленням, інші – призводять до виходу обладнання з ладу на тривалий термін з обов'язковою заміною компонентів.

Відповідно до визначеного критерію всі розглянуті явища можна поділити на дві групи:

- короткострокового впливу;
- довгострокового впливу.

До першої групи передусім належать найпоширеніші види опадів у вигляді снігу та дощу. При суцільній хмарності, що супроводжує опади, СГ знижується до 10% від номінальної потужності, оскільки визначальним чинником є іррадіація, а не самі опади. Додатково, при косому куті падіння сонячних променів на вкриті краплями фотоелектричні модулі (ФЕМ) ефективність знижується на 50-70%, що особливо є актуальним у ранкові та вечірні години під час дощів. Водночас інтенсивні опади здатні очищати забруднені поверхні ФЕМ, частково компенсуючи втрати в наступні сонячні дні. Акумуляція снігу на ФЕМ суттєво знижує генерацію саме в сонячні зимові дні, однак загальні річні втрати від снігового покриву складають лише 1-3,5%, оскільки більшість зимових днів в Україні є хмарними, і потенційна генерація у такі дні є незначною незалежно від наявності снігу. Слід також відзначити позитивний ефект підвищеного альбедо снігового покриву для СГ з двосторонніми ФЕМ, що може збільшувати їх генерацію до 16,5% порівняно з односторонніми аналогами. Окремо слід виділити вплив граду, який може спричиняти фізичне пошкодження ФЕМ, однак за стандартних умов (діаметр градин до 25 мм), виробники ФЕМ гарантують їх цілісність. При екстремальних подіях, що зафіксовані за кордоном, вплив градин з діаметром до 100 мм, пошкоджувалось до 5,5% обстежених ФЕМ із втратою близько 3,6% встановленої потужності. Для більшості регіонів України такі екстремальні події є досить рідкісними, але можуть мати місце в майбутньому в контексті загальних кліматичних змін.

Значно серйозніший вплив мають явища, що належать до другої групи. Наприклад, блискавки є причиною до 26% усіх зафіксованих пошкоджень ФЕМ у світі, причому механізми ураження є різноманітними: як наведені імпульси (деградація ФЕМ, зміна вольт-амперної характеристики та вихід з ладу обладнання), так і безпосередні удари руйнують інвертори, заміна яких вимагає значних фінансових витрат. Таким чином, цей вид пошкоджень має як миттєвий, так і довгостроковий ефект та є найбільш небезпечним у вітчизняних умовах, оскільки висока грозова активність доволі характерна для літнього сезону.

Посуха та високі температури є особливо актуальними для південних та східних регіонів України. В процесі роботи температура ФЕМ може досягати 75-80 °С, тоді як більшість сучасних модулів втрачають 0,29-0,5% потужності на кожен градус підвищення температури відносно стандартних умов тестування (25 °С). Це означає зниження потужності на 14,5–25% в найспекотніші дні, саме тоді, коли попит на електроенергію є найвищим через масове використання кондиціонерів. Крім того посуха може спричиняти пожежі під час яких прямиий вогонь може повністю знищити наземні станції, а дим та тверді частинки поширюються на відстань до 200 км від епіцентру, знижуючи генерацію всіх ФЕС у цьому радіусі в середньому на 8,3%. З огляду на певну щільність розміщення ФЕС, масштабна пожежа здатна одночасно вплинути на генерацію значної кількості станцій, що є системним ризиком для регіону.

Таким чином, для умов України, найбільш небезпечними є: вплив температури у східних та південних регіонах в літній період, ураження блискавками та вплив пожеж на системи генерації. Явища короткострокового впливу хоча й суттєво знижують генерацію на короткий період, не несуть загрозу для обладнання та є досить прогнозованими. Врахування запропонованого підходу при оцінці ризиків впливу дозволить забезпечити більш ефективне визначення доступної потужності ФЕС в екстремальних умовах та своєчасно формувати необхідні управлінські рішення.

ПОСИЛАННЯ

1. Альтернативна енергетика. UkraineInvest. URL: <https://ukraineinvest.gov.ua/industries/energy/alternative-energy/> (дата звернення: 11.04.2025).
2. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та план заходів з його виконання: Розпорядження КМУ від 13 серп. 2024 р. № 761-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/761-2024-p>
3. Пасічник П. О., Погосов О. Г., Кулінко Є. О., Юзьков Д. В. «Сонячні» перспективи України. Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. № 212. 2025. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.212.2025.336302>
4. Медведєва О. О., Гальченко З. С., Демченко О. І. Сучасний стан розвитку відновлюваної енергетики в Україні та можливі рішення. Challenges and Issues of Modern Science. 2025. Т. 4, № 1. С. 145–151. DOI: <https://doi.org/10.15421/cims.4.298>

УДК 637.5.02

ВПЛИВ ДЕГРАДАЦІЇ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ НА ПРОГНОЗУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

П. Д. Лежнюк¹, Т. О. Лиса²

¹Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна,
²Вінницький національний технічний університет
Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, 21021, Україна,
тел.: (068) 058-25-22, e-mail: tetianalysa@vntu.edu.ua

У роботі проаналізовано технічний стан та умови експлуатації фотоелектричних модулів. З огляду на вагому частку ФЕС у балансі електроенергетичних систем, обґрунтовано необхідність визначення можливих обсягів і погодинних графіків генерації електроенергії. В умовах функціонування ринку електроенергії виробники зобов'язані дотримуватися погоджених графіків відпуску, а відхилення призводять до фінансових санкцій.

Ключові слова: балансування електроенергетичної системи, фотоелектричний модуль, градієнт температур, вольт-амперна характеристика.

IMPACT OF PHOTOVOLTAIC MODULE DEGRADATION ON FORECASTING THE POWER OF PHOTOVOLTAIC PLANTS

P. D. Lezhniuk¹, T. O. Lysa²

¹General Energy Institute Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150
²Vinnitsia National Technical University
95 Khmelnytske Shosse, Vinnytsia, 21021, Ukraine,
tel.: (068) 058-25-22, e-mail: tetianalysa@vntu.edu.ua

The paper analyzes the technical condition and operating conditions of photovoltaic modules. Given the significant share of photovoltaic power plants in the balance of electric power systems, the need to determine possible volumes and hourly schedules of electricity generation is justified. In the conditions of the functioning of the electricity market, producers are obliged to adhere to the agreed release schedules, and deviations lead to financial sanctions.

Keywords: balancing of the electric power system, photovoltaic module, temperature gradient, current-voltage characteristic.

ORCID: ¹0000-0003-0338-2131; ²0009-0004-8422-7778.

Вступ

На сьогодні відновлювані джерела енергії, в тому числі ФЕС, займають чільне місце в балансі потужності та електроенергії електроенергетичних систем (ЕЕС). Через нестабільність їх генерування виникають проблеми з балансуванням потужності та електроенергії в ЕЕС. На нестабільність вироблення електроенергії ФЕС впливають як метеорологічні умови, так і технічний стан їх обладнання. Особливо гостро проблема нестійкого генерування ФЕС проявляється тоді, коли вони вимушені працювати з ЕЕС згідно прогнозованого на наступну добу погодинного графіка генерування, який відповідним чином затверджується [1, 2]. В процесі експлуатації ФЕС через деградацію ФЕМ зменшується коефіцієнт корисної дії, від якого залежить її поточне генерування електроенергії і, відповідно, її фактичний графік генерування. Якщо під час визначення прогнозу генерування ФЕС за цей же час не враховується деградація її ФЕМ, то це збільшує похибку в балансуванні електроенергії, яка визначається як [2]. Метою є розробка алгоритму оцінювання впливу деградації ФЕМ на точність прогнозування графіка генерування в процесі балансування потужності та електроенергії в ЕЕС.

Результати дослідження

Для прогнозування погодинного графіка використовується вираз (2) в наступному вигляді:

$$\eta(t) = \frac{P_m(t)}{I(t)S \cos \theta}, \quad (2)$$

де $P_m(t)$, $I(t)$ – погодинні значення відповідно потужності та інтенсивності сонячної радіації.

Ця залежність, за своєю структурою, дає три основні напрямки вдосконалення фотоелектричних модулів, а саме: вивчення природи інтенсивності сонячного випромінювання, підвищення ефективності самого фотоелектричного модуля та підвищення ефективності установки (зменшення кута між напрямком падіння сонячного випромінювання та кутом, перпендикулярним до фотоелектричного модуля).

Оскільки фотоелектричний модуль за своєю конструкцією складається з послідовно з'єднаних фотоелектричних елементів то загальна напруга холостого ходу визначатиметься як їх сума. Як що деякі елементи нагріті більше, то сумарна напруга зменшуватиметься. Струм короткого замикання зазнає меншого впливу від напруги, але за наявності градієнту температур не всі елементи генерують однаково, гарячі елементи створюють менші струми через локальні гарячі точки, як що частина модуля затінена вона може стати баластом як наслідок зниження струму всього модуля.

Як видно з (рис. 1) при зниження температури фотоелектричного модуля (синя крива) за сталого значення сонячної інкапсуляції потужність в точці P_{mpp} зростає і це є позитивним ефектом у визначенні ККД. Але при появі градієнту температури ми можемо звернути увагу на різке зниження потужності (червона крива).

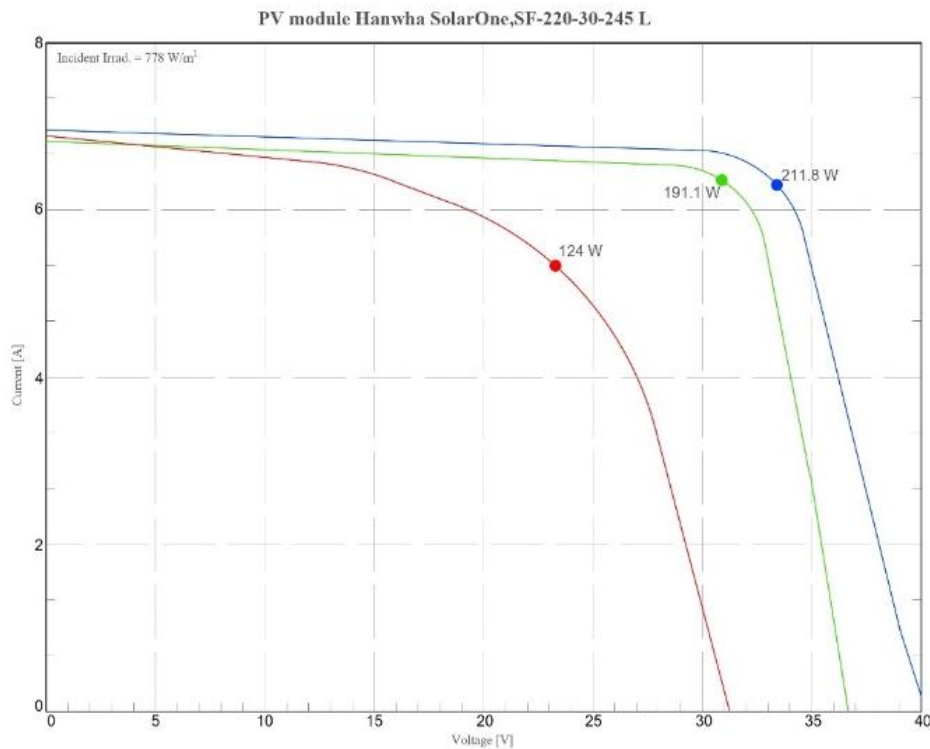


Рисунок 1 – ВАХ фотоелектричного модуля

Висновки

У задачах балансування локальних електроенергетичних систем із ВДЕ визначальними є не лише метеорологічні умови, а й технічний стан обладнання ФЕС, зокрема фотоелектричних панелей. Запровадження механізму компенсації небалансів посилює вимоги до стабільності генерації. Достовірне прогнозування виробітку ФЕС неможливе без оцінки їх технічного стану та врахування деградації модулів. Отже, своєчасна діагностика і заміна дефектних ФЕМ є критично важливими для надійної роботи станції.

ПОСИЛАННЯ:

1. Комар В. О., Лежнюк П. Д., Лесько В. О., Гулько І. О., Смагло І. І. Програмно-апаратний комплекс діагностування технічного стану обладнання фотоелектричних станцій // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність. – № 2. – 2022. – С. 43–50. doi: 10.20998/2224-0349.2022.02.05
2. Gennadii Golub, Egidijus Blažauskas, Nataliya Tsyvenkova Determination of the Installation Efficiency of Vertical Stationary Photovoltaic Modules with a Double-Sided “East–West”-Oriented Solar Panel // Appl. Sci. 2025, 15(3), 1635; <https://doi.org/10.3390/app15031635>

УДК 621.22

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПЛАВНОГО ПУСКУ В СИСТЕМАХ ІЗ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИМИ СТАНЦІЯМИ

В. М. Головка^{1, 2}, Р.Ю. Семененко¹

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна, 03056.

тел.: +38 (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

²Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вулиця Метрологічна 48, м. Київ, Україна, 03143.

тел.: +38 (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

Запропоновано удосконалення методу розробки ітераційної математичної моделі асинхронного двигуна у середовищі MATLAB, адаптованої для роботи в режимі Phasor. Створена модель вирішує задачу несумісності стандартних блоків Simulink із силовими інверторами при моделюванні частотного регулювання. Алгоритм базується на розв'язанні диференціальних рівнянь механічного стану та враховує динамічну зміну реактивної потужності й енергетичні обмеження фотоелектричних установок. Це дозволяє з високою точністю імітувати режими плавного пуску та захисні алгоритми інверторів, при цьому зберігає швидкість перебігу симуляції режиму Phasor.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, асинхронний двигун, MATLAB Simulink, Phasor mode, фотоелектрична станція, плавний пуск, енергоефективність.

MATHEMATICAL MODEL OF AN ASYNCHRONOUS MOTOR FOR SOFT START MODE ANALYSIS IN SYSTEMS WITH PHOTOVOLTAIC POWER PLANTS

V. Golovko^{1,2}, R. Semenenko²

¹National 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

²Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 48 Metrolohična Street, Kyiv, Ukraine, 03143. tel.: +38 (097) 952-41-63, e-mail: golovkovm@ukr.net

An improvement of the iterative mathematical modeling method for an induction motor (IM) within the MATLAB environment, specifically adapted for Phasor mode operation, is proposed. The developed model addresses the incompatibility between standard Simulink blocks and power inverters during variable frequency control simulation. The algorithm is based on solving differential equations of the mechanical state and accounts for dynamic changes in reactive power as well as the energy constraints of photovoltaic (PV) systems. This approach enables high-fidelity simulation of soft start modes and inverter protection algorithms while maintaining the computational speed inherent to the Phasor simulation method.

Key words: renewable energy sources, induction motor, MATLAB Simulink, Phasor mode, photovoltaic power plant, soft start, energy efficiency.

ORCID: 10000-0003-0195-9654; 20000-0003-4737-7836.

Вступ

Моделювання електротехнічних систем, що містять асинхронні двигуни та фотоелектричні станції, вимагає балансу між точністю та обчислювальною швидкістю. Стандартний блок Asynchronous Machine (рис.1) у режимі Phasor[1] не підтримує динамічну зміну частоти, що робить неможливим моделювання частотного пуску (VFD). Водночас перехід на метод обчислення Continuous або Discrete багатократно збільшує час симуляції, що несе певні складнощі при дослідженні роботи двигуна від ФЕС на добовому графіку. Оскільки прямий пуск двигуна від автономних інверторів ФЕС супроводжується критичними просіданнями напруги, обумовленим пусковим струмом, що кратний 5-7 номінальним струмам, розробка спрощеної моделі двигуна, що здатна імітувати роботу інвертора та двигуна, через електромеханічні математичні рівняння, є актуальним завданням для проектування надійних енергосистем.

Методика дослідження

Для реалізації моделі використано метод ітераційного розрахунку миттєвих параметрів у блоці MATLAB Function. Основні наукові засади моделі включають:

- Динаміка механічного стану: Розрахунок кутової швидкості через баланс моментів $\frac{dw}{dt} = \frac{T_e - T_m - Bw}{J}$ [2], що дозволяє імітувати інерційність ротора.
- Енергетичний підхід до $\cos(\varphi)$: Розрахунок реактивної потужності $Q = P \cdot \tan(\varphi)$ як функції від ковзання та навантаженості двигуна.

Адаптація до Phasor: Використання RMS-значень напруги на вході дозволяє інтегрувати модель у складні енергосистеми без потреби в детальному моделюванні ШІМ-сигналів.

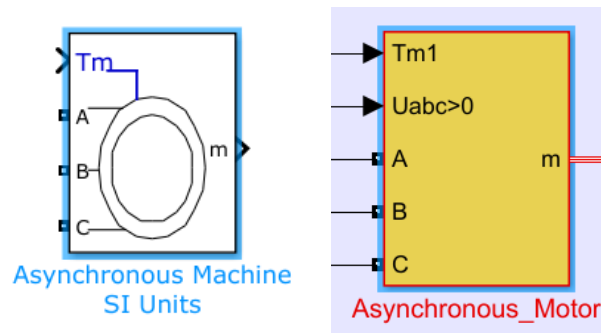


Рисунок 1 – Позначення базового та створеного блоку асинхронного двигуна Matlab SIMULINK

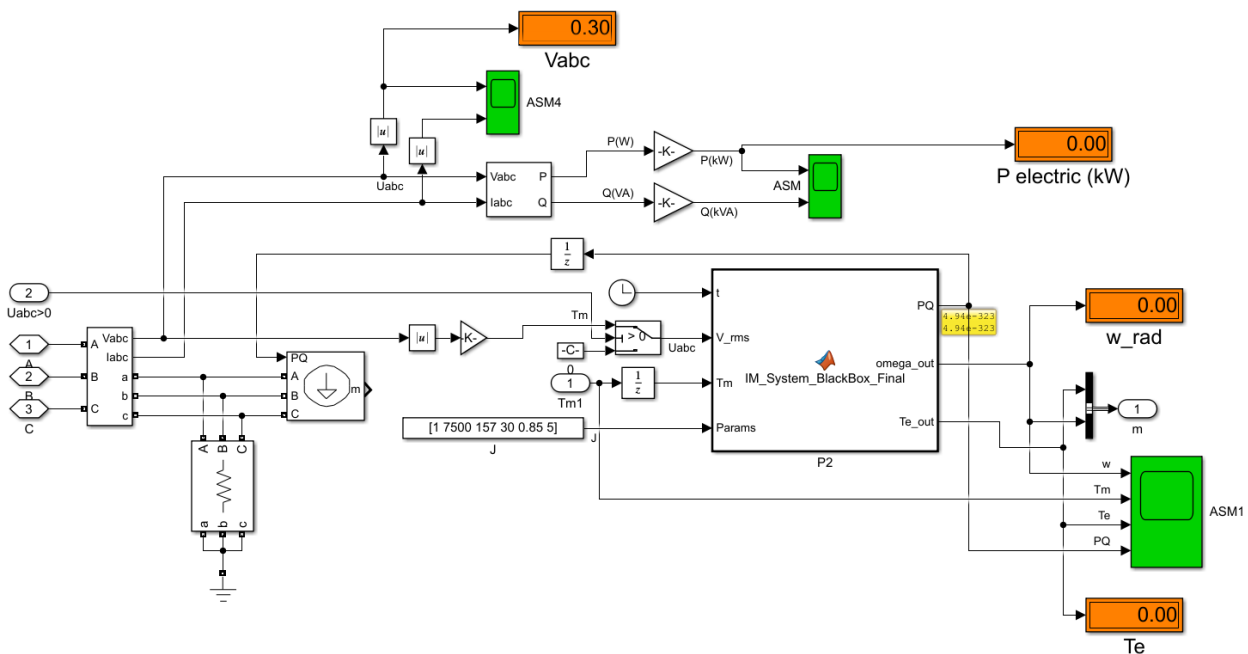


Рисунок 2 – Структурна схема моделі асинхронного двигуна

Представлена схема (рис. 2) реалізує гібридний електромеханічний інтерфейс, що інтегрує модель асинхронного двигуна (АД) у силове коло імітаційної моделі енергосистеми. Схема функціонує за наступною схемою:

- Зняття векторних параметрів мережі. Система починається з блоку трифазного вимірювання напруги та струму. Це дозволяє моделі реагувати на амплітудні просідання напруги, характерні для роботи інверторів ФЕС.
- Обчислювальне ядро. Центральний блок виконує роль цифрового двійника АД. Він розв'язує систему рівнянь у дискретному часі:
 - Механічна підсистема: на основі рівняння руху ротора обчислюється кутова швидкість.
 - Електромагнітна підсистема: визначає електромагнітний момент як функцію ковзання s . На відміну від стандартних бібліотек, такий підхід дозволяє імітувати плавний пуск шляхом штучної зміни параметру синхронної частоти всередині алгоритму.

3. Зворотний зв'язок та стабільність. Для запобігання виникненню алгебраїчних петель, які часто призводять до помилок збіжності в Simulink, у схему введено блоки дискретної затримки.
4. Енергетичний інтерфейс. Найбільш критичним елементом є перетворення обчислених значень P та Q у фізичне навантаження мережі. Це здійснюється за допомогою блоку Dynamic Load (кероване джерело).
5. Моніторинг та параметризація. Вектор Params дозволяє динамічно змінювати константи інерції (J) та номінальні характеристики, що забезпечує універсальність методики для різних типів двигунів.

Висновок

Створення авторського блоку асинхронного двигуна на основі математичних рівнянь дозволило вирішити задачу моделювання частотно-регульованого приводу в режимі Phasor. Результати підтвердили, що такий підхід забезпечує високу швидкість обчислень при збереженні фізичної достовірності процесів. Запропонована модель є ефективним інструментом для аналізу стійкості локальних мереж із відновлюваними джерелами енергії та дозволяє оптимізувати параметри плавного пуску для підвищення загальної енергоефективності систем.

ПОСИЛАННЯ

1. Introducing the Phasor Simulation Method. Simscape Electrical. MathWorks : [офіц. сайт]. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ug/introducing-the-phasor-simulation-method.html> (дата звернення: 30.03.2026).
2. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник для студ. вищ. техн. навч. закл. 2-ге вид., перероб. і допов. Київ : Либідь, 2007. 656 с.

ULTRASONIC SURFACE TREATMENT OF SILICON WAFERS FOR PHOTOVOLTAICS

Aliev R. ^{1*}, Alinazarova M. ², Mirzaalimov N. ³, Jalilova V. ⁴

^{1,3,4} Andijan State University, 129 University str., Andijan, Uzbekistan, 170100

² Namangan State University, 161 Boburshox str., Namangan, Uzbekistan, 160119

Annotation: *An experimental setup for ultrasonic treatment of the surface of silicon wafers has been developed. Experimental ultrasonic treatment (UST) of silicon wafers resulted in a 1.54-fold increase in charge carrier lifetime. The obtained results, along with the physical substantiation of light absorption processes in wafers subjected to surface UST, and changes in the lifetime of photogenerated charge carriers, allow us to recommend a new method for increasing the efficiency of silicon photovoltaic converters.*

Key words: *Silicon, photovoltaic converter, ultrasonic treatment, charge carrier, lifetime.*

ORCID: ^{1*} 10000-0002-7375-727X; ² 0009-0006-5136-5589; ³ 0000-0002-9264-3710

Among the various renewable energy devices, solar photovoltaic power plants (SPPPs) are the most promising for land-based energy generation. Almost all existing SPPPs are based on silicon solar cells [1], and their optical efficiency is one of the most important parameters. This article provides a review of the state of research on the use of ultrasonic processing (USP) to improve the surface properties of semiconductor materials, particularly silicon wafers, intended for the creation of solar photovoltaic converters (PVCs). One of the most promising areas for the development of modern high-efficiency single-junction solar cells is the introduction of fundamentally new materials with nano-heterostructures containing quantum dots (QDs). The absorption properties of such structures, both short-wavelength and long-wavelength solar radiation, demonstrate the feasibility of exploiting quantum-size effects to achieve high solar cell photovoltaic conversion efficiency. Optimal materials for their fabrication and the operating principles of high-efficiency solar cells based on them are also considered. The prospects of fabricating nano-heteroepitaxial structures with QDs using liquid-phase epitaxy with pulsed substrate cooling are scientifically substantiated [1]. Currently, more than 85% of solar cells used in various sectors of the economy are made on the basis of crystalline silicon, and the optical properties of the surface of such materials determine the overall efficiency of solar cells [2].

Various technical methods are used to improve the optical properties of silicon surfaces. One simple method involves applying an antireflective coating (ARC) made of various dielectric oxide materials to the surface. By creating a texture on the surface and applying the ARC, improved efficiency can be achieved [3].

Therefore, research into improving the optical properties of silicon wafers is relevant. This work focuses on a new method for texturing silicon surfaces. Ultrasonic treatment (UST) was used to treat the surface of silicon intended for solar cell manufacturing. Single-crystal p-type silicon wafers were used in the experiments. Ultrasonic treatment of the silicon wafer surface was performed using a specialized device comprising the following components: mechanical action unit; air pressure regulation system; vibrator; mechanical vibration transmission working cylinders; spherical microprobe; pressure transmission channel; compressor; ultrasonic frequency generator. During the study, the surface roughness and reflectivity were measured as functions of the incident light wavelength before and after the RCD. The charge carrier lifetime was also measured before and after the RCD.

We note new trends in the development of semiconductor photovoltaics. For example, materials scientists at the Australian National University have proposed new properties of silicon for the creation of low-cost solar cell technology [4]. Anisotropic deformation of the crystal lattice can impart new properties to the semiconductor, allowing for an expansion of its spectral photosensitivity. Therefore, the authors believe it would be beneficial to develop a new technology for producing strained silicon to create low-cost and highly efficient solar cells.

In [5], a method for increasing the efficiency of solar cells is proposed by applying local pressure to semiconductor crystals when illuminated with optical light of a specific wavelength. Local pressure on the crystal surface results in the development of a mechanical stress gradient within it, and, consequently, a new flexophotovoltaic effect is observed. Based on the crystallographic concepts of semiconductor materials, it can be assumed that such an effect can also be observed in silicon. If a p-n junction is formed, the sensitivity of such a structure significantly exceeds that of a resistor structure. A targeted study of the influence of local mechanical stress on the photoelectric conversion process in silicon structures with a p-n junction is essential. From a physical perspective, in materials with a crystalline structure lacking central symmetry, photogenerated electrons can have different mobilities for different crystallographic orientations [5]. This results in an anomalous photovoltaic effect, which can be used to convert light energy into electric current. With the

correct orientation of the p-n junction front relative to the direction of the local crystal voltage, the efficiency of the solar cell can be increased due to the anomalous photovoltaic effect.

Table 1. Results of measuring the lifetime of nonequilibrium charge carriers in silicon before and after UST

Silicon wafer thickness, μm	Nonequilibrium charge carrier lifetime, μs		
	Original sample	After UST	Back surface after UST, μs
200	0.88	0.96	0.94
203	0.7	0.68	0.71
270	1.79	1.25	1.92
275	5.7	8.76	6.55
280	x	x	x
340	3.8	x	0.96
380	2.14	3.81	2.19
460	4.82	2.28	6.05

Local deformation of the illuminated surface of a semiconductor crystal leads to polarization, which induces a flexoelectric effect due to the generation of a mechanical stress gradient. Deforming the crystal surface using a microindentation needle with a force of up to 15 micronewtons and irradiation with 405 nm laser pulses resulted in an increase in photocurrent of nearly two orders of magnitude. To maximize the bulk lifetime of the semiconductor crystal, an optimal dopant concentration in the base is selected, minimizing the density of defects of various origins [6]. Experimental ultrasonic treatment of silicon wafers resulted in a 1.54-fold increase in the zero-charge lifetime. The obtained results, along with the physical justification for light absorption processes in wafers subjected to surface ultrasonic treatment, and the change in the lifetime of photogenerated zero-charges, allow us to recommend a new method for increasing the efficiency of silicon solar cells. Further determination of more precise ultrasonic treatment modes for silicon surfaces will facilitate the practical application of the proposed method in the industrial production of silicon solar cells.

REFERENCES

1. S.Zaynabidinov, R. Aliyev, M. Muydinova Osobennosti pogloshcheniya izlucheniya v kremnii s poverkhnostnoy teksturoy i yego vliyaniye na svoystva fotoelektricheskikh preobrazovateley. // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» (ISJAEE). – 2019. – № 28–33. – S. 312–317.
2. B.A.Nikitin, V.A.Gusarov Eksperimental'naya otsenka koeffitsiyenta otrazheniya kremniyevykh fotoelektricheskikh preobrazovateley. // Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Al'ternativnaya energetika i ekologiya» (ISJAEE). –2016. – T. 7–8. – S. 12–18; <https://doi.org/10.15518/isjaee.2016.07-08.012-018>.
3. D.A.Lizunkova Issledovaniye elektricheskikh i opticheskikh svoystv fotochuvstvitel'nykh struktur na nanostrukturirovannom kremnii. Dissertation for the degree of Candidate of Physical and Mathematical Sciences in the specialty 01.04.10 – Semiconductor Physics. Samara, 2018. – 150 p.
4. Mark Garlick. Flexo-photovoltaic effect. Science. – 2018. – Vol. 360. – Iss. 6391. – P. 904–907 [Электронный ресурс]; DOI: 10.1126/Science. aan3256. – Режим доступа: <https://nplus1.ru/news/2018/04/20/flexo-photovoltaic-effect>. – (Дата обращения: 25.05.2018).
5. M.-M.Yang, D.J.Kim, M.Alexe New type of silicon promises cheaper solar technology. // Physical Review Letters, Apr., 24, 2019. <https://phys.org/news/2019-04-silicon-cheaper-solar-technology.html>.
6. R. Aliyev, B. Urmanov, M. Muydinova, Zh. Kakharov. Stimulation of the charge carrier lifetime due to the flexoelectric effect on the silicon surface. // Proceedings of the IV International Conference on "Optical and Photoelectric Phenomena in Semiconductor Micro- and Nanostructures" Fergana Polytechnic Institute, May 26–27, 2018, Fergana. – 2018. – pp. 277–279.

MEASURING THE DEPENDENCE OF CURRENT ON VOLTAGE OF AMORPHOUS SILICON USING A THERMAL PHOTOVOLTAIC LABORATORY SETUP

Zulayxo Muhammadnabiyeva¹

Andijan State University

University Street, Andijan, Uzbekistan, 170100

phone +998 90 766 15 14, e-mail: muhammadnabiyevazulayxo@gmail.com

Nowadays, the use of renewable energy sources and environmentally clean energy sources is being widely implemented. To determine the efficiency of photovoltaic parameters of semiconductors, first we obtain results under laboratory conditions. Then, by comparing these results with the theoretical conclusions presented in the literature, we determine their useful work coefficient, the differences between current and voltage, and by finding the overall values, we can identify relative errors.

The "Thermal Photovoltaic Laboratory Setup" allows us to determine the values of variable current at different angles, plot the dependence on voltage, and find the maximum power points. This thesis provides brief information on the dependence of variable current on voltage of amorphous silicon-based solar cells using the "Thermal Photovoltaic Laboratory Setup" and how this device is applied.

Photovoltaic technologies play an important role in converting solar energy into electrical energy, especially amorphous silicon-based solar cells. The main advantage of amorphous silicon-based solar cells is their high absorption coefficient. In addition, like other amorphous materials, amorphous silicon has flexible properties. Therefore, amorphous silicon is used in industry to produce flexible solar cells. However, amorphous silicon has its own drawbacks. One of these drawbacks is that over time, under prolonged exposure to light, amorphous silicon-based solar cells degrade. This phenomenon is known in science as the Staebler-Wronski effect. The essence of the Staebler-Wronski effect is explained by the movement of hydrogen atoms filling the unsaturated bonds in silicon when exposed to light. That is, by introducing hydrogen, it reduces the active sites formed due to unsaturated bonds. However, during prolonged light exposure, a sufficient number of hydrogen atoms break the bonds formed with silicon and create recombination centers. Therefore, amorphous silicon degrades.

The Thermal Photovoltaic Laboratory Setup allows us to observe the changes of variable current and voltage of amorphous silicon-based solar cells under different light intensities and angles. The application and main instructions of the device are as follows:

1. Close the solar panel when the device is not in use.
2. Close the wind turbine when not in use.
3. Clean the top of the solar panel with a damp cloth and place it so that sunlight falls easily.

This device also includes a solar battery system. The application areas of solar battery systems can be divided into two main groups:

1. Grid-connected system – On-grid: Solar systems connected to the electrical network can be large-scale energy systems or, in buildings, small-scale energy systems.
2. Autonomous systems – Off-grid: The energy obtained from solar batteries meets system demands, while excess energy is stored in accumulator batteries. This stored energy is used when solar energy is insufficient, especially at night.

Through this device, we can not only study amorphous silicon solar cells but also determine the photovoltaic parameters of monocrystalline and polycrystalline solar cells under different angles and light intensities. It also allows us to connect them in parallel or series and obtain results. Using this device, we can find how much energy variable current gives under different lighting, and determine how long the surplus energy can be stored in the battery.

REFERENCES

1. Kalogirou, S. A. (2014). Solar Energy Engineering: Processes and Systems. 2nd ed. Academic Press.
2. Green, M. A., Dunlop, E. D., Hohl-Ebinger, J., Yoshita, M., Kopidakis, N., & Hao, X. (2023). Solar cell efficiency tables (Version 61). Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 31(1), 3–16.
3. Poole, C. P., & Owens, F. J. (2003). Introduction to Nanotechnology. Wiley-Interscience.
4. Sze, S. M., & Ng, K. K. (2006). Physics of Semiconductor Devices. 3rd ed. John Wiley & Sons.

УДК 621.311.25

ОПТИМІЗАЦІЯ КУТА НАХИЛУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ ЗІ СХІДНО-ЗАХІДНОЮ ОРІЄНТАЦІЄЮ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ МАКСИМАЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

А. М. Вергун¹ А. І. Захарченко¹ К. В. Кириленко¹

¹Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»,
вул. Політехнічна 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (099) 289-04-05, e-mail: inastyavergun@gmail.com

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу та математичного моделювання процесів сонячної інсоляції на основі вивчення геометричних параметрів розміщення фотоелектричних панелей, їх технічних характеристик та впливу кута нахилу на сумарну річну генерацію електроенергії.

Ключові слова: дахова фотоелектрична станція, східно-західна орієнтація, оптимальний кут нахилу, сонячна інсоляція, енергоефективність, нульовий експорт електроенергії.

OPTIMIZATION OF THE TILT ANGLE OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS WITH EAST-WEST ORIENTATION TO ACHIEVE MAXIMUM GENERATION

A. M. Vergun¹ A. I. Zakharchenko¹ K. V. Kyrylenko¹

¹National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»
37 Polytechnic str., Kyiv, Ukraine, 03056

When solving the problems set in the work, general methods of theoretical analysis and mathematical modeling of solar insolation processes were used based on the study of the geometric parameters of the placement of photovoltaic panels, their technical characteristics, and the influence of the tilt angle on the total annual electricity generation.

Keywords: rooftop photovoltaic power station, east-west orientation, optimal tilt angle, solar insolation, energy efficiency, zero export of electricity..

Вступ. Швидкий розвиток сонячної енергетики в Україні, зумовлений необхідністю проведення децентралізації енергосистеми та підвищення енергонезалежності об'єктів комерційної нерухомості, вимагає впровадження найбільш раціональних технічних рішень. Джерелом енергії для роботи багатьох ліній в мегаполісі міг би стати дах. Використання дахових фотоелектричних станцій (ФЕС) для забезпечення власного споживання підприємств є одне з найбільш перспективних рішень для міської забудови. На відміну від класичних наземних станцій, але обмежений простір міських дахів накладає спеціальні вимоги до монтування фотоелектричних модулів (ФЕМ).

Мета роботи. Визначення та теоретичне обґрунтування оптимального кута нахилу для досягнення максимальної генерації та стабільності енергопостачання

Матеріали і результати досліджень. Дахова фотоелектрична станція (далі ФЕС) на даху готелю «АМАРАНТ» м. Київ, вул. Костянтинівська, 716 призначена для забезпечення власних потреб за схемою «нульового експорту». Встановлена потужність ФЕС за постійним струмом становить 120,4 кВт, за змінним — 100 кВт. Система містить 204 фотоелектричних модулів Jinko Solar JKM590N потужністю 590 Вт кожен. Особливістю технічного рішення є застосування баластної монтажної конструкції зі східно-західною орієнтацією модулів під кутом 15°. Така конфігурація дозволяє максимізувати використання корисної площі покрівлі (527 м²) та забезпечити рівномірний графік генерації протягом світлового дня.

Для перетворення енергії використано мережевий інвертор HUAWEI SUN 2000-100KTL M2, що має 10 незалежних MPPT-трекерів. Це дозволяє оптимізувати роботу 14 стрінгів, сформованих з урахуванням різної орієнтації та інтенсивності затінення окремих частин покрівлі.

Основні параметри, що досліджувалися для оптимізації:

Для визначення оптимального кута нахилу, при якому загальний виробіток електроенергії буде максимальним, проведемо розрахунок який буде базуватися на типових показниках інсоляції для ясного літнього дня у Києві, дані

ФЕС та їх розташування будемо брати з проекту "АМАРАНТ". Дослідження впливу кута нахилу на роботу СЕС базувалося на показниках інсоляції в період літнього сонцестояння. Щоб визначити рівень радіації на фотомодулі зі східним та західним азимутом, було застосовано такий алгоритм: Спершу розрахуємо кут падіння прямого променя (θ), з чого дізнаємося скільки максимально ФЕС отримує від найбільшої можливої прямої сонячної радіації через своє відхилення від перпендикуляра до сонця.

$$\begin{aligned}\cos(\theta) &= \sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) \\ \cos(\theta) &= \sin(60) \cdot \cos(15) \\ \cos(\theta) &= 83,6\%\end{aligned}$$

Далі обчислюємо фактичну інсоляцію на похилу площину (G_C), так як на ФЕС потрапляє два види світла: прямі промені та розсіяні промені від небосхилу, спершу розрахуємо попадання прямих променів ($G_{\text{Прямий}}$):

$$G_{\text{Прямий}} = G_{\text{П}} \cdot \cos(\theta)$$

Далі робимо розрахунок розсіяного компонента за даною формулою:

$$G_{\text{Розсіяний}} = G_{\text{Р}} \cdot \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

Та знайдемо суму прямих та розсіяних променів:

$$G_C = G_{\text{Прямий}} + G_{\text{Розсіяний}}$$

Залишилось розрахувати фактичну потужність станції (P_C), оскільки сонце о 12:00 світить з південної сторони, то східний і західний масив освітлюються симетрично, а взаємне затінення відсутнє $k_3 = 1$. Розрахуємо потужність одного масиву(східного) за даною формулою:

$$P_C = P_{\text{основна с}} \cdot \frac{G_C}{G_{\text{СУ}}} \cdot E \cdot k_3$$

Оскільки західний масив генерує стільки ж як і східний, загальна потужність станції буде розрахована за формулою:

$$P_{\Sigma} = P_C + P_3$$

Це і є кінцевим результатом розрахунку.

Розраховані профілі генерації ФЕС з 6:00 до 18:00 для різних кутів нахилу фотомодулів наведено на рис.1.

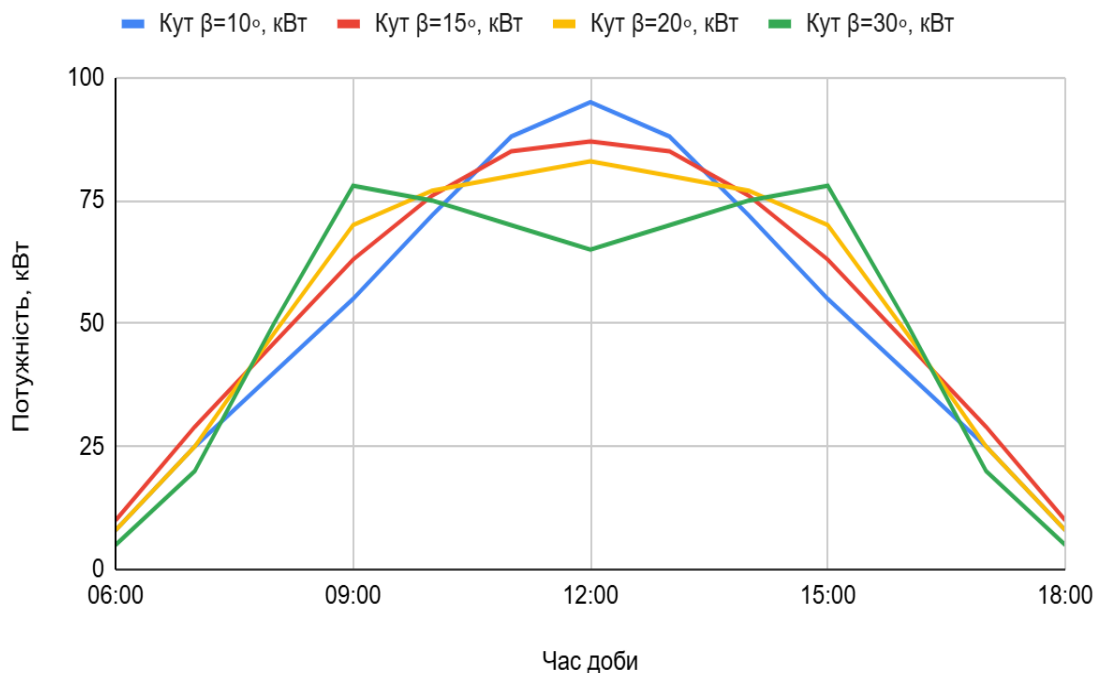


Рис 1. Залежність потужності генерації ФЕС від часу доби для різних кутів нахилу фотомодулів

З таблиці видно, що сума виробляючого ФЕС буде така: під кутом $\beta=10$ градусів виробляється сумарно 431 кВт, така ж сума і при куті $\beta=30$, але при значенні кута $\beta=15$ градусів сума буде дорівнювати 441 кВт, з цих даних ми можемо побачити що при куті 15 градусів у порівнянні з іншими в день виробляється на 2,3% ефективніше.

Час доби	Кут $\beta=10^\circ$, кВт	Кут $\beta=15^\circ$, кВт	Кут $\beta=20^\circ$, кВт	Кут $\beta=30^\circ$, кВт
06:00	8	10	8	5
07:00	25	29	25	20
08:00	40	46	48	50
09:00	55	63	70	78
10:00	72	76	77	75
11:00	88	85	80	70
12:00	95	87	83	65
13:00	88	85	80	70
14:00	72	76	77	75
15:00	55	63	70	78
16:00	40	46	48	50
17:00	25	29	25	20
18:00	8	10	8	5
Разом енергії за добу	671 кВт·год	705 кВт·год	699 кВт·год	661 кВт·год

Висновки. На основі проведеного дослідження можна зробити висновок, що для дахової фотоелектричної станції готелю «АМАРАНТ» у Києві найбільш ефективним рішенням є використання баластної конструкції зі східно-західною орієнтацією та кутом нахилу модулів 15° . Такий підхід дозволяє досягти максимальної добової генерації (441 кВт), забезпечуючи на 2,3% більше енергії порівняно з кутами 10° або 30° , та водночас дає змогу оптимально використати обмежену площу покрівлі без ризику значного взаємного затінення панелей. Встановлена система потужністю 120,4 кВт за схемою «нульового експорту» є економічно доцільним рішенням для покриття власних енергетичних потреб об'єкта в умовах міської забудови. Також варто пам'ятати, що для забезпечення максимальної точності енергетичних прогнозів, розрахунок оптимального кута нахилу має базуватися на комплексному аналізі специфіки конкретного об'єкта: географічного розташування (широти), точної азимутальної орієнтації будівлі та ефективності використання корисної площі покрівлі.

ПОСИЛАННЯ

1. Технічний паспорт модулів для розрахунку ККД та площі
2. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. 4th ed. Hoboken, NJ : John Wiley & Sons, 2013. 928 p.
3. IEC 61724-1:2021. Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. Geneva : International Electrotechnical Commission, 2021.
4. Messenger R. A., Abtahi A. Photovoltaic Systems Engineering. 4th ed. Boca Raton, FL : CRC Press, 2017. 526 p.

ДОСВІД РЕАЛІЗАЦІЇ ІННОВАЦІЙНОЇ ПЛАТФОРМИ АГРЕГАТОРА ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В РАМКАХ ПРОЕКТУ U-CAN

А. В. Яворський¹, М. О. Карпаш², В. Б. Васечко²

¹Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,
вул. Карпатська, 15, м. Івано-Франківськ, 76019, Україна,
тел.: (050) 373-18-63, e-mail: andrii.yavorskyi@nung.edu.ua

²Університет 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 результати впровадження спеціалізованого цифрового сервісу для моніторингу громадських фотоелектричних станцій в Івано-Франківську. Розглянуто можливості платформи ASEMPV щодо уніфікації даних з обладнання різних виробників та роль відкритості енергетичних показників для підвищення енергоефективності громад.

Ключові слова: громадські фотоелектричні станції, моніторинг сонячної генерації, платформа ASEMPV, мультибрендова інтеграція, проєкт U_CAN, енергонезалежність громад..

EXPERIENCE OF IMPLEMENTING AN INNOVATIVE AGGREGATOR PLATFORM FOR MONITORING PHOTOVOLTAIC STATIONS WITHIN THE U-CAN PROJECT

A. V. Yavorskyi¹, M. O. Karpash², V. B. Vasechko²

General ¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
15 Karpatska str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019
phone: (050) 373-18-63, e-mail: andrii.yavorskyi@nung.edu.ua

²King 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 results of implementing a specialized digital service for monitoring public photovoltaic stations in Ivano-Frankivsk. The capabilities of the ASEMPV platform regarding the unification of data from equipment of various manufacturers and the role of energy data transparency for improving the energy efficiency of communities are considered.

Key words: public photovoltaic stations, solar generation monitoring, ASEMPV platform, multi-brand integration, U_CAN project, energy independence of communities.

ORCID: ¹0000-0002-5970-4286; ²0000-0002-4223-3828, ³0009-0007-0414-7308.

В межах реалізації міжнародного проєкту U_CAN (Ukraine-Climate, Action, Nature) [1] в Івано-Франківську презентовано спеціалізований цифровий сервіс для моніторингу громадських фотоелектричних станцій. Платформа, що доступна за посиланням asempv.esco.ua.com/uk/p/ucan/, розгорнута на базі передової української системи ASEMPV [2]. Вона покликана забезпечити повну прозорість та ефективне управління об'єктами відновлюваної енергетики, що працюють на базі провідних університетів міста.

Наразі система об'єднує дані ключових наукових центрів регіону, відображаючи в реальному часі роботу фотоелектричних станцій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу (ІФНТУНГ) та Карпатського національного університету імені Василя Стефаника. Завдяки інтегрованим інструментам аналітики, кожен мешканець громади може відстежувати обсяги генерації «зеленої» енергії та показники скорочення викидів CO₂.

Ключовою особливістю платформи ASEMPV є її здатність працювати в умовах технологічного різноманіття. Система, яка є інноваційною платформою агрегатором, дозволяє збирати, уніфікувати та аналізувати дані з фотоелектричних станцій, побудованих на базі обладнання різних світових виробників (таких як Huawei, Fronius, SMA, Sungrow, Solis,

DEYE та інших). Це критично важливо для муніципальних об'єктів, де на різних локаціях можуть бути встановлені різні типи інверторів. ASEMPV об'єднує їх у єдину інформаційну мережу, надаючи користувачеві цілісну картину роботи всієї енергосистеми міста без необхідності використання окремих систем моніторингу для кожного бренду (рис. 1).

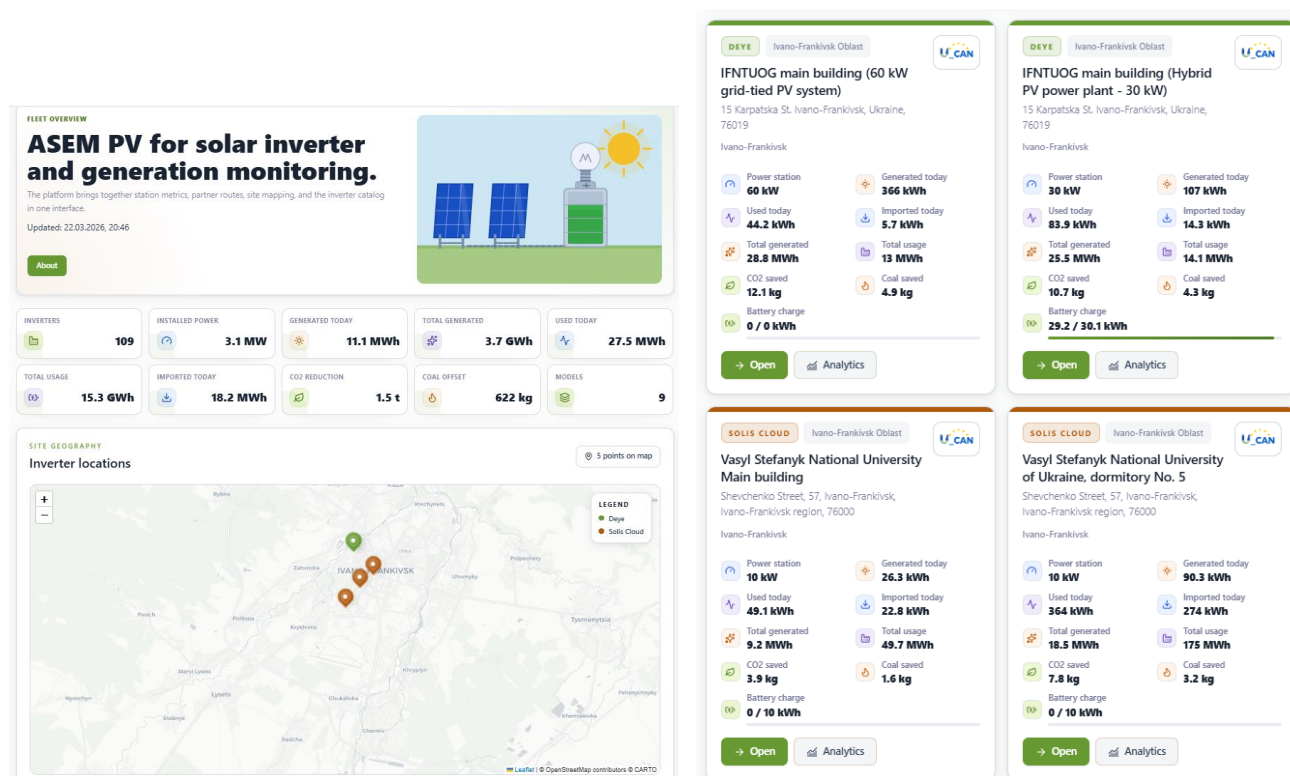


Рисунок 1 – Представлення роботи громадських фотоелектричних станцій м. Івано-Франківська, які побудовані на базі обладнання різних виробників (DEYA, Solis) на базі інноваційної ппттформи агрегатора ASEMPV

Особливу увагу в межах проєкту приділено відкритості даних для громади. Платформа ASEMPV демонструє, як цифровізація допомагає громадам ставати енергонезалежними: кожен кіловат, вироблений сонячними станціями університетів, — це пряма економія бюджетних коштів та зменшення навантаження на загальнонаціональну енергосистему. Такий підхід робить моніторинг не просто технічним звітом, а інструментом соціальної довіри та екологічної просвіти.

Окрім суто енергетичного ефекту, платформа виконує важливу освітню та наукову місію. Відкриті дані моніторингу стають цінним ресурсом для студентів та науковців ІФНТУНГ та Карпатського національного університету, які можуть використовувати реальні показники сонячних станцій для проведення досліджень та вивчення особливостей відновлюваної енергетики в кліматичних умовах Прикарпаття. Таким чином, проєкт U_CAN сприяє підготовці нового покоління фахівців, здатних працювати з інтелектуальними системами управління енергією.

Впровадження такого інструменту є стратегічним кроком для Івано-Франківська на шляху до кліматичної нейтральності. Це створює новий стандарт прозорості у муніципальному енергоменеджменті та стає прикладом для «зеленого» відновлення інфраструктури по всій Україні, підтверджуючи статус міста як одного з лідерів енергоефективності.

ПОСИЛАННЯ

1. Проєкт U_CAN — ініціатива з посилення кліматичної стійкості громад через впровадження ВДЕ. URL: <https://www.ucan-ukraine.eu/uk>.
2. ASEMPV — мультибрендовий моніторинг для сонячної енергетики. URL: <https://asempv.escoua.com/uk/>.

ЗАРЯДНА ІНФРАСТРУКТУРА ЕЛЕКТРОМОБІЛЯ НА ОСНОВІ ВІДНОВЛЕНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

Лаврич Ю. М., Плаксін С. С., Погоріла Л. М., Подчасов А. Ю.

*Інститут транспортних систем і технологій НАН України,
вул. Писаржевського, 5, м. Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (050) 905-51-95, e-mail: lavrsch@westa-inter.com.*

У роботі розглянуто деякі проблемні питання, що перешкоджають ширшому використанню електроавтомобілів. Вказано, що використання значного зростання електроавтомобіля не здатне суттєво знизити екологічну забрудненість навколишнього середовища. Запропоновано використання сонячної енергії для створення сучасної зарядної інфраструктури електрооб'їзду.

Ключові слова: енергія, електроавтомобіль, сонячні батареї, архітектура, інфраструктура.

ELECTRIC VEHICLE CHARGING INFRASTRUCTURE BASED ON RENEWABLE ENERGY

Yu. M. Lavrich¹, S. V. Plaksin², L. M. Pohorila³, A. Yu Podchasov⁴.

*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 examines some problematic issues that hinder the wider use of electric vehicles. It is indicated that the use of a significant increase in electric vehicles is not able to significantly reduce environmental pollution. It is proposed to use solar energy to create a modern charging infrastructure for electric vehicles.

Keywords: energy, electric car, solar panels, architecture, infrastructure

ORCID:¹0000-0003-3616-2135; ²0000-0001-8302-0186; ³ 0000-0002-3718-0733; ⁴0009-0005-5869-2489

Застосування альтернативних джерел енергії стає невід'ємною частиною будь-якої економіки, що сприяє усуненню причин екологічного забруднення довкілля. Темпи розвитку електротранспорту випереджають темпи створення зарядної інфраструктури. Статистичні дані говорять про те, що в середньому автомобіль перебуває в русі всього 4% часу, а 96% часу, що залишилися, автомобілі знаходяться на стоянці і наражаються на небезпеку втрати ємності. Як і в більшості країн світу, зарядна інфраструктура для електричних автомобілів у країні лише починає розвиватися. Традиційні зарядні станції, що використовують електроенергію із централізованих мереж, створюють високе навантаження на енергосистему. Масштабний перехід використання електрооб'їзду сприяє зростанню електроспоживання електрооб'їзду, тому необхідно створення відповідної зарядної інфраструктури, не використовуючи електромережі.

Одним із варіантів покращення роботи централізованої енергосистеми є використання в якості джерела живлення відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Враховуючи ступінь відпрацьованості технологій та застосовності ВДЕ, найбільш доцільно, при розробці зарядної інфраструктури електрооб'їзду, використання сонячної енергетики.

Потрібно розробити платформу, яка об'єднує всі зарядні станції в один зрозумілий сервіс із розумним плануванням маршрутів, реальними даними в реальному часі, простим роумінгом та аналітикою.

Ефективність електрооб'їзду зарядних станцій (ЕМЗС) залежить від місця розміщення і найбільш ефективно застосування досягається розміщенням безпосередньо на місцях розміщення існуючих автомобільних заправних станцій (АЗС) або поряд з ними.

Станції повинні бути багатофункційними та забезпечити заряд змінним (АС, 7-22 кВт) та постійним струмом (ДС, 50+ кВт, "швидкі"). Аналіз існуючої транспортної інфраструктури показав, що на АЗС, паркінгах, торгово-розважальних центрів, можуть бути використані для розміщення сонячних панелей з різними типами роз'ємів. В Україні використовуються два типи зарядних станцій: «повільні» АС ≤ 22 кВт — 76% та «швидкі» ДС ≥ 22 кВт — 24%.

Багатофункціональність джерела заряду може бути реалізована лише використанням інтелектуальної системи управління. Модель інтелектуального управління розробляється з урахуванням машинного навчання, що дозволяє оптимізувати процес зарядки електрооб'їзду.

У нас немає активної підтримки держави в розбудові інфраструктури, тому цей ринок розвивається за законами попиту і пропозиції, зарядки розташовані хаотично.

Інфраструктура ЕМЗС включає транспортну міську та магістральну складові, реалізація кожної з них, має низку відмінностей, які необхідно врахувати при проектуванні зарядної інфраструктури.

Враховуючи, що в міському середовищі розміщення необхідного потенціалу сонячної енергетики потребує значних площ, одним із варіантів може бути використання дахів над обладнанням та вільних площ існуючих АЗС для розміщення не тільки сонячних панелей, а й створення (поза АЗС) «сонячних полів». Таке рішення є економічно вигідним для створення електрозарядної інфраструктури, суттєво спрощує та скорочує терміни її створення. Одним з можливих місць розміщення ЕМЗС може бути місця парковки, бо велика площа та кількістю авто, дозволяє встановлення сонячних панелей.

Менш вирішеним, як і в передових країнах, є зарядна інфраструктура на магістралях, не кажучи вже про прості дороги. На рис.1 показан можливий вид магістральної ЕМЗС.

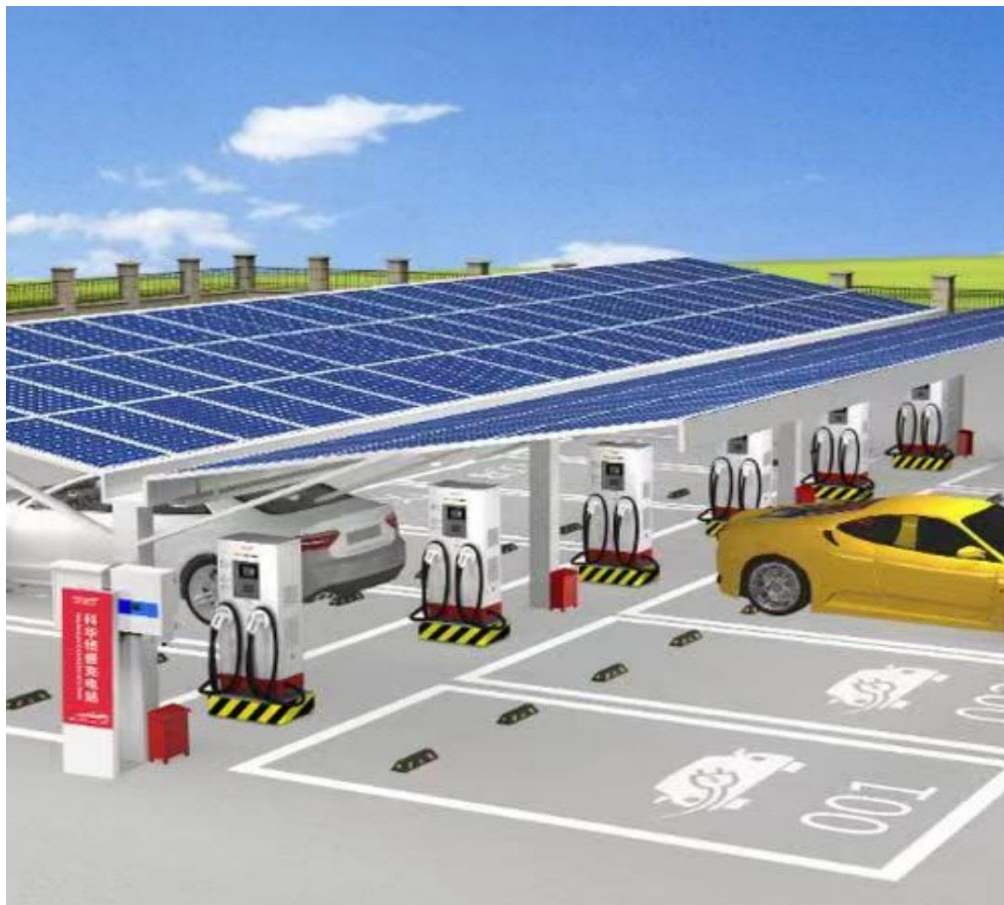


Рис.1. Можливий вид магістральної ЕМЗС

Інститут має досвід розробки концепції інтеграції магнітоелектричного транспортного засобу та розподіленої сонячної енергетичної системи. Використовуючи досвід, розроблено концептуальні засади побудови магістральної зарядної інфраструктури, основними вимогами для реалізації магістральної зарядної інфраструктури є:

1. Кількість та відстань між ЕМЗС, які розраховуються виходячи з відомих даних про характеристики електромобілів. Сьогодні в Європі ця відстань становить 60 км.
2. Переважним типом ЕМЗС має бути швидка зарядка. З урахуванням специфіки заряду в дорозі, саме час є основним фактором вибору ЕМЗС. Час визначається потужністю станції зарядки, але чим вона більша, тим сильніше вона впливає на ресурс акумулятора.
3. Створення керованої інтелектуальної інфраструктури, що забезпечує, незалежно від типу автомобіля, можливість заряджання вздовж усієї траси.
4. Інфраструктура повинна відповідати вимогам відкритої архітектури, що дозволяє змінювати характеристики ЕМЗС. Однією з характеристик ЕМЗС є можливість одночасної зарядки різнотипних електромобілів, що реалізуються шляхом формування апаратно-технологічної надмірності станції.

5. Конструктивне виконання ЕМЗС має ступень захисту від впливу зовнішніх факторів, рівня IP54.
6. Гарантованість зарядки реалізується шляхом інтеграції станції до електромережі, забезпечуючи режим аварійної роботи ЕМЗС. Важливим засобом вибору максимуму сонячного випромінювання є система автоматичного стеження за Сонцем. Враховуючи розміщення магістральної інфраструктури поза населеними пунктами, стає можливим використання потенціалів космічної енергетики.

Створення зарядної інфраструктури потребує активнішої участі держави, особливо на регіональному рівні, залучення постачальників електромобілів, що стало звичайною практикою більшості світових виробників.

Використання відновлюваної енергетики для створення зарядної інфраструктури електромобіля представляє майбутнє екологічного транспорту та енергетики. Технології постійно розвиваються стають більш ефективними та доступними, довговічними, а електромобілі – все більш поширеними, а повноформатне використання переваг ВДЕ визначається ефективністю засобів реалізації.

МАСКУВАННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ПЕРЕГРІВУ ТА ВІДДЗЕРКАЛЕННЯ

Т. В. Суржик¹, О. М. Суржик², І. О. Шейко³

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net*

Розглянуто використання автономної мобільної сонячної електричної станції для забезпечення електроенергією віддалених об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій та інших умовах, що вимагають їх маскування. Запропоновано способи зниження теплової та оптичної контрастності фотоелектричних модулів з урахуванням ефектів їх перегріву та віддзеркалення.

Ключові слова: сонячна енергія, фотоелектричні модулі, тепла та оптична контрастність, способи охолодження фотоелектричних модулів, віддзеркалення.

ORCID: ¹0000-0002-1418-7748, ²0000-0002-7403-8584, ³0000-0002-5770-3677

У роботі розглянуто використання автономної мобільної сонячної електричної станції (СЕС) невеликої потужності (до 5 кВт) для забезпечення електроенергією віддалених об'єктів, що не можуть бути підключені до мережі електропостачання, а також застосування її в умовах надзвичайних ситуацій. Автономні сонячні електричні станції використовують сонячну енергію для виробництва та зберігання електроенергії. Ці станції є незалежними від мережі і дозволяють забезпечувати електроенергією віддалені об'єкти. Автономна сонячна станція складається з фотоелектричних модулів (ФЕМ), контролера заряду, акумуляторних батарей для зберігання енергії, інвертора для перетворення постійного струму, який виробляють сонячні панелі, на змінний струм, а також інших компонентів, які забезпечують оптимальне функціонування станції.

Автономна сонячна станція має багато переваг, таких як екологічність, економічність, незалежність, надійність. До основних недоліків слід віднести: залежність від погодних умов; зниження основних електричних характеристик зі зростанням температури активної поверхні фотоперетворювачів і, як наслідок, зменшення її енергоефективності; створюваний нею такий оптичний ефект як віддзеркалення від поверхонь фотоелектричних модулів.

У даній роботі розглядаються питання використання фотоелектричних модулів (систем) в умовах надзвичайних ситуацій та інших умовах, що вимагають їх маскування від виявлення. Ці питання можна вирішити за допомогою зниження теплової та оптичної контрастності: зниження теплового випромінювання при перегріві фотоелектричних модулів в процесі їх роботи; зменшення віддзеркалення від активних поверхонь ФЕМ. Для оперативного маскування фотоелектричних модулів конструктивно має бути забезпечена можливість складати ФЕМ активними поверхнями одна до одної (як «книга»). Це може бути виконано як у ручному режимі, так і у автоматичному (за допомогою контролера з датчиком звуку).

Зниження перегріву ФЕМ, способи їх охолодження. Електрична потужність ФЕМ суттєво падає, коли температура фотоелемента підвищується (лише 5–20% сонячних променів, що потрапляють на поверхню фотоелектричного модуля, перетворюються в електричну енергію) [1]. Із підвищенням температури значення основних характеристик модуля (напруги холостого ходу й потужності) погіршуються: це відбувається тому, що фотоелектричні елементи перетворюють сонячну радіацію з довжиною хвиль, яка відрізняється від спектру, необхідного теплому колектору для нагріву теплоносія. Під час роботи сонячних модулів без відводу теплової енергії інфрачервона тепла складова сонячної радіації іде на нагрів фотоелементів, що часто призводить до їх перегріву й падінню фотоелектричного ККД (іноді до 20 % в порівнянні з паспортними даними) [2].

Для зниження робочих температур фотоелектричних модулів пропонується використовувати активні системи охолодження. Відповідне охолодження ФЕМ зменшує втрати на виході та підвищує надійність фотоелектричного модуля. Для активного охолодження потрібен охолоджувач, наприклад повітря чи вода, який зазвичай включає потужність вентилятора або насоса, відповідно. Відведення теплоти повітряним або рідким теплоносієм, який циркулює по контуру теплоприймальної системи, перешкоджає перегріву фотоперетворювачів і, відповідно, підвищує сумарне вироблення електричної енергії. Високий коефіцієнт поглинання сонячних елементів дає змогу до 60% сонячного випромінювання використовувати на нагрів поверхні теплоприймача і, відповідно, забезпечує до 60% підвищення ККД. Фотоелектрична установка з примусовим охолодженням – це комбінований фототелектричний модуль [3]. Слід зазначити, що при аналізі конструкції комбінованого ФЕМ на практиці виявляється нагальна потреба у використанні газоподібного теплоносія (гарячого повітря) у багатьох технологічних процесах. Тому є привабливою розробка і використання комбінованого ФЕМ з примусовим повітряним охолодженням.

Таким чином, є доцільним використання комбінованих фотоелектричних модулів, в як їх примусове відведення теплоти теплоносієм захищає фотоперетворювачі від перегріву, і, відповідно, виконує функцію маскування шляхом зменшення випромінювання теплової енергії, а також підвищує сумарне виробництво електричної енергії (підвищує їх ККД). Одержана при цьому теплоприймачем енергія може використовуватись для потреб теплопостачання.

Віддзеркалення від фотоелектричних модулів. Просторовий розподіл інтенсивності відбитого світла визначається відношенням розмірів нерівностей поверхні (кордони розподілу) до довжини хвилі падаючого випромінювання. Якщо нерівності малі в порівнянні до довжини хвилі падаючого випромінювання, має місце правильне, або дзеркальне, відбиття світла. Коли розміри нерівностей співрозмірні з довжиною хвилі падаючого випромінювання або перевищують її (шорстки поверхні, матові поверхні) і розташування нерівностей безладне, відбиття світла є дифузним. Можливе також змішане відбиття світла, при якому частина падаючого випромінювання відбивається дзеркально, а частина – дифузно [4].

Точний відсоток світла, який дзеркально відбивається від фотоелектричних панелей в даний час невідомий. Однак, оскільки модулі плоскі, відполіровані, доцільно припустити, що більша частина світла відбивається дзеркальним чином і тим самим докорінно відрізняється від тієї, котра відбивається від більш грубої поверхні. Потенційними наслідками відбиття сонячного світла від фотоелектричних станцій різних видів (наземних, дахових або стінових) на відслідковуваних системах є блиск і відблиски.

Щоб обмежити відбиття, фотоелектричні модулі виготовляються з темних світлопоглинаючих матеріалів і покриваються шаром антивідбиваючого (противіддзеркалюючого) покриття нанесенням спеціальної синтетичної плівки тощо. Після нанесення антивідбиваючого покриття робоча поверхня ФЕМ (наприклад, пластина кремнію) поглинає більшу частину сонячного випромінювання, що падає на її поверхню. Причому товщина покриття оптимізована таким чином, щоб працювати у найбільш ефективному діапазоні спектра. За відомими статистичними даними сучасні ФЕМ відбивають 1-2% від сонячного світла, що надходить на їх поверхню (залежно від кута орієнтації на Сонце і за умови використання антивідбиваючого покриття). Вищезгадане значення дозволяє зробити висновок про те, що від типового фотоелектричного модуля відбивається до 20 Вт/м² [4, 5].

Таким чином, для зменшення віддзеркалення є доцільним використання сучасних ФЕМ з антивідбиваючим (противіддзеркалюючим) покриттям, що забезпечують 1-2% відбиття.

Висновки.

У випадку застосування автономної мобільної СЕС для забезпечення електроенергією віддалених об'єктів в умовах надзвичайних ситуацій та інших умовах, що вимагають їх маскування, пропонується:

- 1) для зниження робочих температур використовувати комбіновані фотоелектричні модулі, в яких примусове відведення теплоти теплоносієм захищає фотоперетворювачі від перегріву, і, відповідно, виконує функцію маскування шляхом зменшення випромінювання теплової енергії;
- 2) для зменшення віддзеркалення використовувати сучасні ФЕМ з антивідбиваючим (противіддзеркалюючим) покриттям, що забезпечує не більше 2 % відбиття.

За необхідності оперативного маскування ФЕМ має бути забезпечена можливість їх складання активними поверхнями одна до одної (як «книга»). Це може бути виконано як у ручному режимі, так і у автоматичному (за допомогою контролера з датчиком звуку).

ПОСИЛАННЯ:

1. Dwivedi Pushpendu, Sudhakar K., Soni Archana. (2020). Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. Case Studies in Thermal Engineering. no. 21. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>.
2. Кувшинов В. В. Підвищення потужності серійних сонячних установок при комбінованій виробітці теплової та електричної енергії: автореф. дис. канд. техн. наук : 05.14.06. Київ, 2011. 20 с.
3. Матях С.В., Резцов В.Ф., Суржик Т.В. Комплексні рішення в сонячній енергетиці // Відроджувана енергетика. – 2022. – №3 (70). – С. 68-74. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).68-74](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).68-74).
4. Ландсберг Г.С. Оптика. 6-те вид., стереот. – Вид-во: ФІЗМАТЛІТ, 2003. - 848 с.
5. Основи технології виробництва кремнієвих сонячних фотоперетворювачів. URL: <https://avenston.com/articles/fundamentals-of-the-technology-of-production-of-silicon-solar-cells/> (дата звернення: 18.03.2026).

MASKING OF PHOTOELECTRIC SYSTEMS TAKING INTO ACCOUNT THEIR OVERHEATING AND REFLECTION

T. Surzhyk¹, O. Surzhyk², I. Sheiko³

Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine,

50 Metrohichna street, Kyiv, Ukraine, 03143

Tel/fax:+38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net

This paper examines the use of an autonomous mobile solar power station to supply electricity to remote sites during emergencies and other situations where concealment is required. Methods are proposed for reducing the thermal and optical contrast of photovoltaic modules, taking into account the effects of overheating and reflection.

Key words: *solar energy, photovoltaic modules, thermal and optical contrast, methods of cooling photovoltaic modules, reflection.*

ORCID: [10000-0002-1418-7748](https://orcid.org/10000-0002-1418-7748), [20000-0002-7403-8584](https://orcid.org/20000-0002-7403-8584), [30000-0002-5770-3677](https://orcid.org/30000-0002-5770-3677)

This paper examines the use of a small-scale (up to 5 kW) autonomous mobile solar power station to supply electricity to remote sites that cannot be connected to the mains grid, as well as its application in emergency situations. Autonomous solar power stations use solar energy to generate and store electricity. These stations are independent of the grid and enable remote locations to be supplied with electricity. An autonomous solar power station consists of photovoltaic modules (PV modules), a charge controller, storage batteries for energy storage, an inverter for converting the direct current generated by the solar panels into alternating current, as well as other components that ensure the station operates optimally. An autonomous solar power station offers many advantages, such as environmental friendliness, cost-effectiveness, independence and reliability. The main disadvantages include: dependence on weather conditions; a reduction in key electrical characteristics as the temperature of the active surface of the photovoltaic cells rises and, consequently, a decrease in its energy efficiency; and the optical effect it creates, such as reflection from the surfaces of the photovoltaic modules. This paper examines the use of photovoltaic modules (systems) in emergency situations and other conditions requiring them to be concealed from detection. These issues can be resolved by reducing thermal and optical contrast: reducing thermal radiation when photovoltaic modules overheat during operation; and reducing reflection from the active surfaces of the photovoltaic modules. To enable rapid concealment of photovoltaic modules, the design must allow the modules to be folded with their active surfaces facing each other (like a 'book'). This can be done either manually or automatically (using a controller with a sound sensor).

Reducing overheating in PV modules and methods for cooling them. The electrical output of a PV module drops significantly as the temperature of the photovoltaic cells rises (only 5–20% of the sunlight striking the surface of the photovoltaic module is converted into electrical energy) [1]. As the temperature rises, the module's key performance characteristics (open-circuit voltage and power) deteriorate: this occurs because the photovoltaic cells convert solar radiation at wavelengths that differ from the spectrum required by the thermal collector to heat the heat transfer fluid. When solar modules operate without heat dissipation, the infrared thermal component of solar radiation is used to heat the photovoltaic cells, which often leads to their overheating and a drop in photovoltaic efficiency (sometimes by up to 20% compared to the rated specifications) [2].

To reduce the operating temperatures of photovoltaic modules, it is recommended to use active cooling systems. Adequate cooling of the PV modules reduces output losses and improves the reliability of the photovoltaic module. Active cooling requires a coolant, such as air or water, which typically involves the power consumption of a fan or pump, respectively. Heat dissipation via an air or liquid coolant circulating through the heat transfer system prevents the photovoltaic cells from overheating and, consequently, increases total electricity generation. The high absorption coefficient of solar cells allows up to 60% of solar radiation to be used to heat the heat collector surface and, consequently, provides up to a 60% increase in efficiency. A forced-cooling photovoltaic system is a combined photovoltaic module [3]. It should be noted that, when analysing the design of a combined photovoltaic module, there is in practice an urgent need to use a gaseous heat transfer fluid (hot air) in many technological processes. Therefore, the development and use of a combined photovoltaic module with forced air cooling is attractive.

Thus, it is advisable to use combined photovoltaic modules in which forced heat removal by the heat transfer medium protects the photovoltaic converters from overheating and, accordingly, performs a shading function by reducing thermal radiation, as well as increasing the total electricity generation (increasing their efficiency). The energy captured by the heat exchanger in this process can be used for heating purposes.

Reflection from photovoltaic modules. The spatial distribution of the intensity of the reflected light is determined by the ratio of the dimensions of the surface irregularities (boundaries of the distribution) to the wavelength of the incident radiation. If the irregularities are small compared to the wavelength of the incident radiation, regular, or specular, reflection of light occurs. When the dimensions of the irregularities are comparable to the wavelength of the incident radiation or exceed it (rough surfaces, matt surfaces) and the arrangement of the irregularities is random, the reflection of light is diffuse. Mixed reflection of light is also possible, in which part of the incident radiation is reflected specularly and part diffusely [4]. The exact percentage of light that is specularly reflected from photovoltaic modules is currently unknown. However, as the modules are flat and polished, it is reasonable to assume that most of the light is reflected specularly and thus differs fundamentally from that reflected from a rougher surface. Potential consequences of sunlight reflection from various types of photovoltaic stations (ground-mounted, roof-mounted or wall-mounted) on tracking systems are glare and reflections.

To minimise reflection, photovoltaic modules are manufactured from dark, light-absorbing materials and coated with an anti-reflective layer, such as a special synthetic film. After the anti-reflective coating has been applied, the working surface of the PV module (e.g. a silicon wafer) absorbs most of the solar radiation falling on its surface. Moreover, the thickness of the coating is optimised to operate within the most efficient spectral range. According to known statistical data, modern PV module reflect 1–2% of the sunlight falling on their surface (depending on the angle of orientation towards the Sun and provided an anti-reflective coating is used). The above figure suggests that up to 20 W/m² is reflected from a typical photovoltaic module [4, 5]. Thus, to reduce reflection, it is advisable to use modern PV modules with an anti-reflective coating, which provide 1–2% reflectance.

Conclusions.

When using autonomous mobile solar power stations to supply electricity to remote sites during emergencies and other situations requiring concealment, the following is recommended:

- 1) to reduce operating temperatures, use combined photovoltaic modules in which forced heat dissipation via a heat transfer medium protects the photovoltaic converters from overheating and, consequently, serves a camouflage function by reducing thermal energy radiation;
- 2) to reduce reflection, use modern PV modules with an anti-reflective coating, ensuring no more than 2% reflection.

If rapid masking of the PV modules is required, it must be possible to fold them with their active surfaces facing each other (like a 'book'). This can be done either manually or automatically (using a controller with a sound sensor).

REFERENCES

1. Dwivedi Pushpendu, Sudhakar K., Soni Archana. (2020). Advanced cooling techniques of P.V. modules: A state of art. Case Studies in Thermal Engineering. no. 21. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2020.100674>.
2. Kuvshinov V. V. Increasing the power of serial solar installations in combined production of heat and electricity: author's abstract of the dissertation of the candidate of technical sciences: 05.14.06. Kyiv, 2011. 20 p.
3. Matyakh S.V., Reztsov V.F., Surzhik T.V. Integrated solutions in solar energy // Renewable Energy. – 2022. – No. 3 (70). – P. 68-74. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).68-74](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).68-74).
4. Landsberg G.S. Optics. 6th ed., stereot. – Publisher: FIZMATLIT, 2003. - 848 p.
5. Fundamentals of silicon solar photovoltaic production technology. URL: <https://avenston.com/articles/fundamentals-of-the-technology-of-production-of-silicon-solar-cells/> (access date: : 18.03.2026).

УДК 620.91: 697.337

КРИТЕРІЇ ОЦІНКИ ПАРАМЕТРІВ ГЕЛІОПАСИВНИХ СИСТЕМ ОПАЛЕННЯ МАЛОПОВЕРХОВИХ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

Л.А. Кирнос¹, Т.В. Суржик²

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (067) 649-06-68, e-mail: larakirnos@gmail.com*

В даній роботі розглянуто питання параметричної оцінки ефективності геліопасивних систем опалення, яка базується на визначенні теплового балансу між надходженням сонячної енергії крізь теплогенеруюче огороження і тепловим навантаженням будинку. Визначено, що моделювання процесів теплогенерації, теплопереносу, теплопередачі в системі «будинок із геліопасивною системою опалення», враховує синергетичну взаємодію геліоресурсних, теплофізичних, теплоенергетичних параметрів. Запропоновано диференційовано розглядати систему геліопасивної теплогенерації на підставі теплофізичної моделі будинку як «опалювального об'єму, обмеженого теплозахисною огорожувальною оболонкою».

Ключові слова: геліопасивна система опалення; параметрична оцінка; геліопасивні компоненти; тепловий баланс.

ORCID: ¹0000-0003-2503-3071; ²0000-0002-1418-7748.

CRITERIA FOR EVALUATING THE PARAMETERS OF SOLAR-PASSIVE HEATING SYSTEMS IN LOW-RISE RESIDENTIAL BUILDINGS

L. Kyrnos¹, T. Surzhyk²

*Institute of Renewable Energy, National Academy Of Sciences Of Ukraine,
50 Metrolozhichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (067) 649-06-68, e-mail: larakirnos@gmail.com*

This paper examines the issue of parametric evaluation of the efficiency of a solar-passive heating system, which is based on determining the heat balance between solar energy gain through the heat-generating envelope and the building's heat load. It has been determined that modeling the processes of heat generation, heat transfer, and heat conduction in the "building with a solar-passive heating system" system takes into account the synergistic interaction of solar resource, thermophysical, and thermal-energy parameters. It is proposed to consider the solar-passive heat generation system in a differentiated manner based on a thermophysical model of the building as a "heating volume bounded by a thermally insulating envelope."

Keywords: solar-passive heating system; parametric assessment; solar-passive components; heat balance

ORCID: ¹0000-0003-2503-3071; ²0000-0002-1418-7748.

Вступ

Не дивлячись на значну кількість досліджень, поєднаних із пасивною теплогенерацією в будинках на основі поглинання і акумулювання сонячного випромінювання [1-4], на сьогодні відсутні теоретичні моделі, які враховують синергетичні аспекти теплообміну і теплоперенесення в компонентах геліопасивної системи, яка інтегрована в конструкції будинку. Якщо брати до уваги вищесказане, то теплофізичні, геліоресурсні та теплоенергетичні параметри будинку разом з його компонентами являються визначальними для моделювання теплових потоків в геліопасивній системі сонячного опалення.

Основний зміст

Параметрична оцінка ефективності геліопасивної системи для цільової функції опалення малоповерхового житлового будинку базується на визначенні теплового балансу між надходженням сонячної енергії крізь теплогенеруюче огороження і тепловим навантаженням будинку. Системний підхід заключається в моделюванні теплового

процесу, який враховує теплофізичні, геліоресурсні, теплоенергетичні параметри будинку з інтегрованими в його зовнішню оболонку елементи сонячної теплогенерації.

Слід відмітити, що способи пасивного отримання теплоти шляхом перетворення сонячного випромінювання в теплову енергію базуються на природних фізичних процесах теплоперенесення і теплообміну, які хаарактеризуються величиною та напрямом потоків теплоти, температурним перепадом на межах середовищ, які відрізняються теплофізичними властивостями, геометричними параметрами [1-3]. Компоненти геліопасивної системи інтегровані в конструкції будинку відповідають параметрам, які мають суміщену функціональну приналежність.

Розглянемо теплову модель малоповерхового житлового будинку з геліопасивною системою опалення в умовах холодного сезону (опалювальний період) і достатньо потужної сонячної радіації. Теплова модель визначена у вигляді компактно зблокованих приміщень (опалювальний об'єм), обмежених ефективною теплозахисною оболонкою (огороджувальні конструкції), в південно-орієнтовану сторону яких інтегровані компоненти, які перетворюють сонячне випромінювання в теплову енергію.

У геліопасивній системі використовують два види теплоносіїв – повітря і воду. Огородження, що інтегроване в зовнішню оболонку будинку, призначене для сонячної теплогенерації шляхом нагрівання водяного теплоносія в трубах. У цьому випадку водовідведення водяного теплоносія здійснюється через трубопровід, що підімкнутий до бака-акумулятора гарячої води по циркуляційному контуру. Бак-акумулятор іншим контуром підімкнутий до теплообмінників водяної системи опалення (радіатори гарячої води), які нагрівають повітря в приміщеннях до значення результуючої температури [12], котра і являється критеріальним (нормативним) параметром мікроклімату. В моделі теплового режиму геліопасивного будинку розглядаються чотири компоненти: модульне геліопасивне огороження (сонячна теплогенерація), обладнання доставлення теплоносія; тепловий акумулятор; будинок як опалювальний об'єм, обмежений теплозахисною оболонкою.

Компоненти геліопасивної системи з повітряним теплоносієм відповідають наступним процесам: перетворення сонячного випромінювання в теплоту за рахунок нагрівання повітря в геліоогороженні (елементи теплозахисної оболонки будинку), термосифонне перенесення нагрітого (або охолодженого) повітря по вентиляційним каналам або безпосередньо в приміщення; накопичення теплоти в тепловому акумуляторі або безпосередньо в будівельних конструкціях; опалювальний об'єм будинку, обмежений теплозахисною оболонкою.

Теплові процеси в геліопасивній системі розглядаються як частковий випадок теплового режиму будинку [7-9], в якому враховуються теплофізичні, теплоенергетичні, геліоресурсні параметри.

Геліоресурсні параметри [4,5,9]:

- сумарна (пряма і розсіяна) сонячна радіація на горизонтальну і вертикальну поверхні;
- добові, місячні, сезонні коливання сонячної радіації;
- сонячні теплонадходження в будинок крізь вікна в опалювальний період, кВт•ч;
- клімато-географічні умови.

Теплофізичні параметри [8]:

- приведений опір теплопередачі зовнішнього огороження, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$;
- нормований опір теплопередачі зовнішнього огороження, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{Вт}$;
- нормований перепад температур внутрішнього повітря і внутрішньої поверхні огороження;
- розрахункова температура зовнішнього повітря;
- коефіцієнт теплопровідності матеріалу, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;
- загальний коефіцієнт теплопередачі будинку, $\text{Вт} / (\text{м} \cdot ^\circ\text{C})$;
- теплофізичні властивості огорожувальних конструкцій і акумулятора теплової енергії.

Теплоенергетичні параметри [10,11]:

- тепловтрати із опалювального об'єму будинку крізь огороження за рахунок теплопередачі (трансмісія), Вт;
- тепловтрати приміщення за рахунок теплопередачі крізь всі огороження будинку, Вт;
- потреба у тепловій енергії на опалення будинку за опалювальний період, кВт•год;
- градусо-доба опалювального періоду;
- питома теплова характеристика будинку, $\text{Вт} / (\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$;
- витрати теплоти на нагрівання інфільтраційного повітря в опалювальному об'ємі будинку, Вт;
- загальні тепловтрати будинку за опалювальний період, кВт•год.

Сезонне виробництво теплоти (опалювальний період) геліопасивною системою, $Q_{p,sol}$, кВт•год опалення в малоповерховому будинку, який використовує тільки сонячну енергію, визначають за формулою теплового балансу:

$$Q_{p,sol} = f_{p,sol} \cdot Q_{p,build}$$

де $f_{p,sol}$ -- коефіцієнт заміщення теплового навантаження будинку в опалювальний період геліопасивною системою;

$Q_{p,build}$ – потреба в тепловій енергії на опалення [13] геліопасивного будинку в опалювальний період, кВт•год.

Висновки

Встановлено, що моделювання теплових процесів в геліопасивних системах опалення, які інтегровані в конструкції малоповерхового житлового будинку, провадяться на основі аналізу параметрів: теплофізичних, геліоресурсних, теплоенергетичних.

Визначено, що геліопасивна система опалення розглядається у складі теплофізичної моделі будинку – «опалювальний об'єм, обмежений зовнішньою теплозахисною оболонкою» – як чотири компоненти (підсистеми): модульне геліопасивне огороження (сонячна теплогенерація); обладнання доставлення теплорносія; тепловий акумулятор; будинок як опалювальний об'єм, обмежений теплозахисною оболонкою.

Вказано, що параметрична оцінка ефективності геліопасивної системи опалення базується на визначенні теплового балансу між надходженням сонячної енергії крізь теплогенеруюче огороження до геліопасивної системи і тепловим навантаженням будинку в опалювальний період.

ПОСИЛАННЯ

1. Бекман У.А., Клейн С.А., Даффі Д.А. Проразунок систем сонячного теплопостачання / М. Энергоіздат, 1982 — 357 с. [Rus].
2. 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].
3. Зоколей С., Сонячна енергія в будівництві: Пер. с англ. / Під ред. Ю.Н. Млевського — М.: Стройиздат, 1979 — 208 с. [Rus].
4. Валов М.И., Казаджан Б.И., Використання сонячної енергії в системах теплопостачання // Монографія - М.: Взд-во МЕІ. 1991 — 267 с. [Rus].
5. Авезов Р.Р. та інші, Системи сонячного тепло- і холодопостачання / Під ред. Э.В. Сарнацького і С.А. Чистовича — М.: Стройиздат, 1990 — 328 с. [Rus].
6. Богословський В. Н., Будівельна теплофізика (теплофізичні основи опалення, вентиляції і кондиціонування повітря) — 2-е вид. перероб. і доп. / Видавн. Вища школа. 1982 — 415 с. [Rus].
7. Маляренко В.А., Редько А.Ф., Чайка О.И., Поволочко В.Б. Технічна теплофізика огорожуючих конструкцій будівель та споруд. // Зав. ред. проф. В.А. Маляренко.— Х.: "Рубікон", 2001. — 280 с. [Ukr].
8. Малявина Є.Г., Тепловтрати будинку. Довідковий псібник / "АВОК-ПРЕСС", 2007 — 144 с. [Rus]. <http://www.nchkz.ru/lib/50/50453/index.htm>
9. Табунщиков Ю.А., Хромец Д.Ю., Матросов Ю.А., Тепловий захист огорожуючих конструкцій будинків і споруд / — М.: Стройиздат, 1986 — 380 с. [Rus].
10. Круковський П.Г., Зворотні задачі тепломасообміну (загальний інженерний підхід) / К.: Інститут технічної теплофізики НАН України, 1998 — 224 с. [Ukr].
11. ASHARE standards 03-2003. Methods of testing to determine the thermal performance of solar collectors. Atlanta. ASHARE, 2003. [Eng].
12. Кирнос Л.А., Суржик Т.В., Оптимізація теплообмінних процесів в комбінованій геліопасивній стіні із замкнутим конвекційним контуром // XXV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Україна, Київ: 22–24 травня 2024 р., [Ukr].
13. ДБН В.2.6-31:2016 Теплова ізоляція будівель // Мінрегіон України, Державне підприємство «Укрархбудінформ» / Київ. 2017 — 30 с. [Ukr].

TROMBE WALL MODEL

Milan Belik¹, Ondřej Hoštička¹, Olena Rubanenko^{1,2,3}

¹University of West Bohemia in Pilsen,
26 Univerzitní str., Plzeň, 30100, Czech Republic
phone: (420) 377-634-315, e-mail: belik4@fel.zcu.cz

²Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
50 Metrolohichna str., 50, Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (044) 206-28-09, e-mail: olenarubanenko@ukr.net

³Vinnitsya National Technical University,
95 Khmelnytsky highway, Vinnitsya, 21021, Ukraine,
phone: (097) 748-02-85, e-mail: rubanenkae@ukr.net

The project presents a functional model of the Trombe wall – a passive solar system designed with an emphasis on simplicity, low costs and practical use in current trends in alternative housing. In times of rising energy costs and the unavailability of one's own housing, there is increasing interest in self-sufficient, mobile and environmentally friendly forms of housing – such as the so-called tiny houses or modular units. However, these often encounter problems with efficient heating in winter and overheating in summer. The Trombe wall in a modern concept offers a passive solution to these challenges – without the need for complex technologies, with minimal costs and a long service life. As part of the project, a real model was designed and tested in Laboratory of Renewable energy. The result is a system that is easily repairable, almost maintenance-free and ideally suited to an environment where every watt and centimeter counts.

Key words: Trombe wall, passive solar system, heat transfer, energy efficiency, renewable energy, alternative housing (tiny house), thermal storage.

МОДЕЛЬ СТИНИ ТРОМБА

Мілан Белік¹, Ондřej Гоштічка¹, Олена Рубаненко³

¹ Західночеський 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 шосе 95, Вінниця, 21021, Україна,
тел.: (097) 748-02-85, e-mail: rubanenkae@ukr.net

Проект представляє інженерну модель стіни Тромба - пасивної сонячної системи, оптимізованої за критеріями простоти, низької вартості та інтеграції в альтернативне житло (tiny houses, модульні будинки). Система базується на акумулюванні та передачі теплової енергії через теплоакumuлюючий масив, повітряний прошарок і прозоре покриття, забезпечуючи регулювання теплового режиму без активних систем.

Ключові слова: integrated energy system, guarantees of origin of electricity, green hydrogen.

ORCID: ¹0000-0002-9907-5365; ²0000-0002-2660-182X

Introduction.

Nowadays, systems that use renewable energy sources and at the same time enable low-cost and self-sufficient solutions for heating or cooling buildings are gaining importance. The Trombe wall, as a passive solar device, represents one of these principles, which is verified and further investigated in this work.

The objective of this work is to develop and experimentally validate an improved Trombe wall system that combines passive solar heat accumulation with adaptive control mechanisms to enhance thermal performance in energy-efficient

buildings. The system is intended for application in low-cost, modular, and small-scale housing, where maintaining a stable indoor thermal environment is challenging due to variable climatic conditions.

The task includes the design of a physical prototype, integration of sensor-based monitoring and control of airflow, and evaluation of the system's ability to reduce heat losses, improve solar heat utilization, and ensure indoor thermal comfort with minimal energy input. The casing of the Trombe wall model is made of extruded polystyrene with a thickness of 100 mm. Inside, there is a heat storage element made of cast concrete with a thickness of 35 mm. The outer surface of the concrete is painted black. Movable wooden flaps are installed at the top and bottom. The model dimensions are approximately 780 × 580 × 580 mm. It is designed for quick placement against a window (double glazing of the FEL building). Sealing is used to ensure tight contact between the glass and the model. A gap of 85 mm between the glass and the storage element is required for air heating. Precise adjustment of the model is achieved using adjustable legs, while transport wheels mounted on an OSB base board allow easy movement [1]. The model is shown in Figure 1.

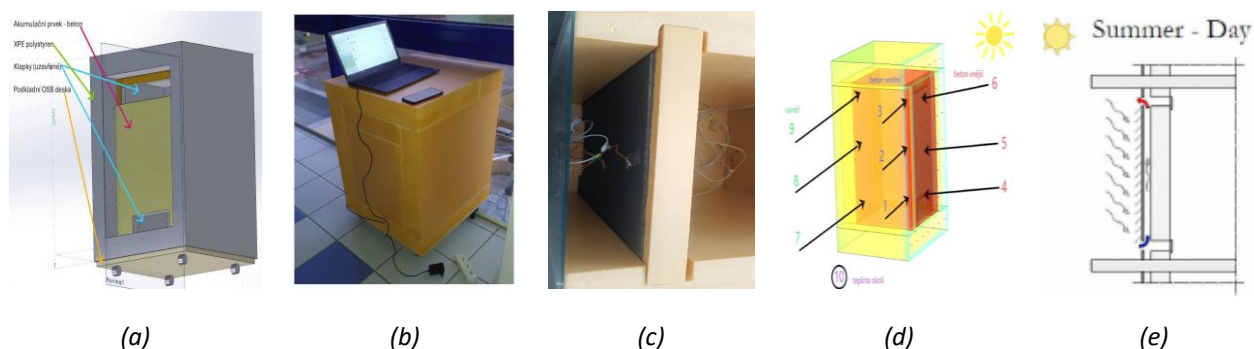


Fig. 1. (a) model of of the Trombe wall; (b) real measurement conditions of the Trombe wall; (c) view inside; (d) view inside; (e) mode of measurement.

Table 1: Selected temperatures of the Trombe wall over time.

Time [h]	Sensor 2 T1 (°C)	Sensor 6 T2 (°C)	Sensor 10 T3 (°C)	Sensor 3 T4 (°C)	Sensor 1 T5 (°C)	Sensor 9 T6 (°C)	Sensor 4 T7 (°C)	Sensor 7 T8 (°C)	Sensor 8 T9 (°C)	Sensor 5 T10 (°C)
5	14	13.56	19.75	14.19	13.81	15.94	11.75	15.69	15.63	12.88
6	13.63	13.19	19.88	13.81	13.44	15.63	11.56	15.25	15.25	12.56
7	13.56	13.38	20.06	13.81	13.44	15.50	12.25	15.06	15.13	12.81
8	14.06	14.19	20.25	14.25	14.00	15.81	13.69	15.19	15.44	13.75
9	15.44	16.00	20.56	15.56	15.44	16.63	16.69	15.81	16.25	15.75
10	17.56	19.25	21.25	17.69	17.81	17.94	21.88	17.06	17.69	19.50
11	29.13	37.06	25.06	29.63	29.19	25.25	50.06	22.69	24.81	40.06
12	45.38	54.81	26.63	46.44	44.75	39.50	67.25	34.44	38.25	58.13
13	57.65	67.13	27.24	60.20	57.98	52.13	77.27	46.66	50.77	70.41
14	66.88	73.63	27.31	68.19	65.69	59.63	81.00	54.19	58.31	76.31
15	67.84	71.63	26.98	69.31	65.25	61.20	70.60	56.66	60.05	68.01
16	61.19	64.31	25.94	60.13	63.19	59.75	54.13	56.94	59.63	62.00
17	53.44	58.00	25.38	52.56	54.38	52.50	50.81	51.19	52.50	56.31
18	47.88	51.88	24.63	47.13	48.63	47.13	44.13	46.50	47.25	49.81
19	43.00	46.19	24.00	42.38	43.38	42.25	37.50	42.38	42.69	43.75
20	38.19	40.88	23.69	37.56	38.25	37.81	32.81	38.19	38.19	38.50
21	34.25	36.50	23.25	33.81	34.25	34.19	29.69	34.69	34.63	34.38
22	31.25	33.00	22.88	30.88	31.19	31.25	27.44	31.81	31.69	31.13
23	28.81	30.13	22.50	28.50	28.69	28.94	25.56	29.44	29.31	28.50

24	26.81	27.75	22.19	26.63	26.69	27.06	24.00	27.44	27.31	26.44

Acknowledgement This result was supported by project 26-PKKV-UM-002.

A Trombe wall model was developed and demonstrated acceptable accuracy in predicting the thermal behavior of the system. The simulations revealed a high sensitivity to atmospheric boundary conditions, particularly solar irradiance, indicating that more precise environmental measurements would further improve model reliability. Due to the computational complexity of the analysis, several simplifications were implemented to reduce calculation time. In addition, an Arduino-based control system was developed and experimentally tested to monitor and regulate the operation of the passive solar system.

REFERENCES

1. Ondřej Hoštička. Konstrukce a modelování Trombeho stěny (21.4.2025)
2. Z. Jia, M. Wang, and C. Xiang, "Photovoltaic Trombe wall system: Multi-functional performance, optimization parameters, and evolutionary insights—A comprehensive review," *Journal of Building Engineering*, vol. 115, p. 114536, 2025, doi: 10.1016/j.jobee.2025.114536.

ДЕГРАДАЦІЯ КРЕМНІЄВИХ ПЛАСТИН ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ

Д.І. Брюховських¹, О.В. Остапчук^{1,2}

¹Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
пр. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна

²Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Гната Хоткевича, 20А, Київ, 02094, Україна
тел. +38 (066) 147-09-10, e-mail: O.Ostapchuk@kpi.ua

При розв'язанні поставлених у роботі задач використовувалися загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення фізичних властивостей різних видів кристалів кремнію, що використовуються в конструкціях фотоелектричних модулів, причин та особливостей їх деградації.

Ключові слова: деградація фотоелектричних модулів, ефективність фотоелектричних модулів, фактори старіння.

DEGRADATION OF SILICON WAFERS OF PHOTOVOLTAIC MODULES

D. Briukhovskiykh¹, O. Ostapchuk^{1,2}

¹National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37 Beresteyskiy Ave., Kyiv, 03056, Ukraine

²Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
20A Hnata Khotkevycha Str., Kyiv, 02094, Ukraine
tel. +38 (066) 147-09-10, e-mail: O.Ostapchuk@kpi.ua

To solve the tasks set in the paper, general methods of theoretical analysis of the problem were applied, based on the study of the physical properties of different types of silicon crystals used in the construction of photovoltaic modules, as well as the causes and specific features of their degradation.

Keywords: degradation of photovoltaic modules, efficiency of photovoltaic modules, aging factors

ORCID: ¹0009-0001-6970-9523; ²0000-0003-3397-2423.

Сонячна енергетика — один із перспективних напрямів використання енергії відновлюваних джерел, що швидко розвивається. З усіх відновлюваних джерел сонячна енергія є найбільш ємним і доступним природним енергоресурсом; щодо її використання накопичено багатовіковий історичний досвід [1]. Для географічних умов України найбільш доцільним є використання енергії Сонця в установках, що працюють на явищі фотоефекту. Такі установи складаються з фотоелектричних модулів — груп сонячних елементів, з'єднаних послідовно, — та фотоелектричних масивів, тобто груп модулів, які можуть бути з'єднані як послідовно, так і паралельно. Отже, ефективність фотоелектричної системи (ФС) пропорційна вихідній потужності її модулів, на яку впливають властивості сонячних елементів та навколишнього середовища. Такі фактори, як опромінення, робоча температура модуля, швидкість вітру, температура навколишнього середовища, кут установлення та ступінь деградації модуля, суттєво впливають на їх продуктивність [2]. У процесі експлуатації фотомодулів відбувається їх поступова деградація, що пов'язано як з особливостями режиму експлуатації, так і з впливом зовнішніх факторів. Процесу деградації піддаються всі наявні конструкції фотомодулів — полікристалічні, монокристалічні та плівкові [3].

За результатами досліджень, проведених в останні роки, швидкість деградації фотомодулів становить 0,6–0,7 % на рік і може мати як лінійний, так і нелінійний характер залежно від основних механізмів, що її спричиняють. Лінійна деградація має місце у випадку, коли її швидкість є постійною в часі, що призводить до поступового зниження продуктивності фотомодуля. Нелінійна деградація відбувається, коли її швидкість змінюється з часом, спричиняючи прискорене або уповільнене зниження продуктивності [4].

Погіршення ефективності роботи ФС може мати як внутрішні, так і зовнішні джерела. Прикладом зовнішнього впливу є дія різноманітних чинників навколишнього середовища: температури, вологості, вітру та ультрафіолетового випромінювання. Зазначені фактори можуть пошкодити сонячні елементи або захисний шар, який їх покриває, що зрештою призводить до зниження їх ефективності. Прикладом внутрішнього впливу є погіршення якості електричних з'єднань між елементами або несправності в сонячних елементах, такі як тріщини чи забруднення. Конструкція фотомодуля, умови його експлуатації та якість матеріалів, що використовуються під час виготовлення, впливають на швидкість деградації панелі.

Температура та вологість мають різноманітні наслідки для ФС, які можуть призвести до виходу з ладу та передчасного погіршення стану панелей. Через термомеханічні навантаження у фотомодулі можуть з'явитися тріщини. Такі елементи все ще здатні виробляти струм, але напруга буде нижчою, а вихідна потужність зменшиться. З часом частка тріщин збільшується, що збільшує і кількість пошкоджених елементів.

До характерних пошкоджень можна також віднести вплив вологи, який призводить до деградації ФС через такі механізми:

- корозія металевих частин фотомодуля, включно з рамою та електричними з'єднаннями, що зумовлює збільшення опору та зниження ефективності;
- розшарування матеріалів, таких як герметик або задній шар, що призводить до відокремлення шарів і погіршення характеристик фотомодулів та інших зовнішніх елементів;
- утворення альтернативних шляхів протікання електричного струму, що знижує ефективність та підвищує ймовірність пожеж або тяжких пошкоджень.

Накопичення пилу на поверхнях фотоелектричних модулів також знижує їх ефективність, блокуючи сонячне світло та підвищуючи робочу температуру, що призводить до термічної деградації. Аналогічно впливає й зміна кольору, спричинена дією ультрафіолетового випромінювання, яка знижує ефективність унаслідок поглинання меншої кількості сонячного світла [4].

Результати досліджень [5], виконаних за допомогою методів лінійної регресії (LR) та класичної сезонної декомпозиції (CSD), показують, що аморфний кремній (a-Si) деградує швидше, ніж його аналоги, зі швидкістю $0,90 \pm 0,009$ %/рік та $0,75 \pm 0,003$ %/рік відповідно; далі йдуть монокристалічний (m-Si) — $0,53 \pm 0,01$ %/рік та $0,41 \pm 0,003$ %/рік, та полікристалічний кремній (p-Si) — $0,36 \pm 0,01$ %/рік та $0,28 \pm 0,004$ %/рік. Зазначені показники деградації є зіставними з даними, отриманими в дослідженнях за різних кліматичних умов Марокко. Окрім того, результати розрахунку нормованої вартості енергії (LCOE) свідчать, що технологія p-Si є найбільш економічно ефективною — $0,09$ USD/(кВт·год) — порівняно з $0,10$ USD/(кВт·год) для m-Si та $0,13$ USD/(кВт·год) для a-Si. Згідно з результатами [5], p-Si є найбільш оптимальною технологією для впровадження в гірському помірному кліматі.

Таким чином, проведений аналіз сучасних досліджень показав, що деградація кремнієвих фотоелектричних модулів є складним багатофакторним процесом, який визначається як внутрішніми чинниками (якість матеріалів, дефекти структури, стан електричних з'єднань), так і зовнішніми (температура, вологість, ультрафіолетове випромінювання, забруднення поверхні, термомеханічні навантаження). Швидкість деградації істотно залежить від типу використаного кремнію: найвищі темпи характерні для аморфного (a-Si), найнижчі — для полікристалічного (p-Si) кремнію, що в поєднанні з нижчою нормованою вартістю енергії робить p-Si найбільш економічно доцільною технологією для помірних кліматичних умов, у тому числі для більшої частини території України. Урахування механізмів і темпів деградації є необхідною умовою як для коректного прогнозування продуктивності ФС, упродовж усього терміну експлуатації, так і для обґрунтованого вибору матеріалів та конструктивних рішень під час проектування сонячних електростанцій. Подальші дослідження доцільно зосередити на розробленні методів сповільнення процесів деградації та на створенні методик прогнозування залишкового ресурсу фотомодулів у конкретних кліматичних умовах України.

ПОСИЛАННЯ

1. Буслова Н. В., Сидоренко В. А. Сонячна енергетика в Україні та світі. Scientific Collection «InterConf». 2022. № 116 : Proceedings of the 12th International Scientific and Practical Conference «Scientific Research in XXI Century» (July 16-18, 2022, Ottawa, Canada). Ottawa : Methuen Publishing House, 2022. С. 325–330.
2. Santhakumari, M., Sagar, N. A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2019. Vol. 110. P. 83-100.
3. Панченко В. В., Харін Р. О. Дослідження впливу деградації сонячних панелей на ефективність роботи сонячної електростанції. Харків, 2023. 10 с. URL: <http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/17865/1/Panchenko.pdf>.
4. Rahman T., Mansur A. A., Lipu M. S. H. Investigation of degradation of solar photovoltaics: a review of aging factors, impacts, and future directions toward sustainable energy management. Energies. 2023. Vol. 16, No. 9. DOI: <https://doi.org/10.3390/en16093706>.
5. Ameer A., Berrada A., Bouaichi A., Loudiyi K. Long-term performance and degradation analysis of different PV modules under temperate climate. Renewable Energy. 2022. Vol. 188. P. 37–51.

**RESOLUTION-DEPENDENT PERFORMANCE OF LLM PROMPT STRATEGIES
FOR SOLAR PANEL DETECTION IN AERIAL IMAGERY****S. I. Shapovalova¹, S. V. Matiakh², M. A. Holovakin³**^{1, 2, 3} *National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
37, Prospect Beresteyskyi, Kyiv, Ukraine, 03056*² *Institute of Renewable Energy of the National Academy the Sciences of Ukraine
50 Metrolohichna str., 50, Kyiv, Ukraine, 03143*

Phone: +380660887500, e-mail: golovakin.kinds@gmail.com

The task of detecting solar panels in aerial images of cities using the GPT-4o large language model is formulated. Four prompt strategies for target object detection are developed. A dataset of 1,000 images is prepared using downsampling and spatial decomposition methods. Computational experiments are conducted to determine the optimal prompt strategy depending on spatial resolution.

Key words: *aerial photograph, solar panels, object detection in images, LLM, GPT-4o, prompt strategy, spatial resolution.*

ORCID: ¹0000-0002-3431-5639; ²0000-0002-1707-3519; ³0009-0006-1456-8926.

The problem of detecting specified objects in aerial photographs is complicated by the fact that images are captured using different equipment, from different angles, and at different distances, which affects image quality, in particular spatial resolution. Such tasks can traditionally be solved as semantic segmentation problems. However, this approach requires the preparation of specialised datasets oriented toward the target object, solving augmentation tasks, image annotation, as well as training and validating neural network models [1]. Moreover, creating appropriate datasets for non-standard target objects is significantly more difficult. Therefore, it is necessary to investigate the possibility of using an alternative approach – determining the presence of an object in an image using large language models. The aim of this work is to determine the optimal prompt strategy depending on the current spatial resolution of the image.

The task of detecting the presence of solar panels in aerial photographs of cities is formulated. The model used for computational experiments is GPT-4o [2]. Four prompt strategies [3] are proposed to solve the task. Experiments are conducted on a dataset of 1,000 aerial image fragments [4].

Ten images with a high spatial resolution of 0.1 m/pixel were obtained via the WMS service API [4]. The downsampling method was applied to simulate image quality degradation. Thus, 10 images with spatial resolutions of 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 m/pixel were obtained. Spatial decomposition of aerial photographs into local fragments was then performed: each image was divided into 100 fragments of 512 × 512 pixels. The resulting dataset for experiments comprised 1,000 samples.

Four prompt strategies with different target object detection logic [3] were used to solve the task: (1) classification based on basic feature interpretation; (2) binary classification on image examples; (3) classification based on step-by-step feature analysis; (4) classification based on hypotheses.

The simulation parameter was the spatial resolution of the image, and the evaluation criteria were Precision, Recall, and F1-Score. Figure 1 shows the dependence of Precision on the spatial resolution of the image for each prompt strategy.

At high detail (0.1 m/pixel), the leader is "binary classification on image examples"; however, when the pixel size exceeds 0.5 m, its performance drops sharply. The highest robustness to data degradation is demonstrated by "classification based on hypotheses", which maintains precision at the level of 0.7 even at 200 cm/pixel, significantly outperforming basic feature interpretation.

In summary, a set of images corresponding to spatial resolutions of 0.1, 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 m/pixel has been prepared based on the downsampling method and spatial decomposition of aerial photographs. Four prompt strategies for solar panel detection in images have been developed, differing in detection logic: basic classification based on basic feature analysis, binary classification based on image examples, classification based on step-by-step feature analysis, and classification based on hypotheses. Computational experiments have been conducted to determine the optimal prompt strategy for detecting solar panels in aerial photographs depending on the current spatial resolution. The results indicate that the hypothesis-based strategy demonstrates the highest resilience to resolution degradation, maintaining acceptable precision even at coarse pixel sizes, whereas example-based binary classification achieves the best results

exclusively at high resolution. These findings confirm that the choice of prompt strategy should be adapted to the available image quality rather than applied uniformly.

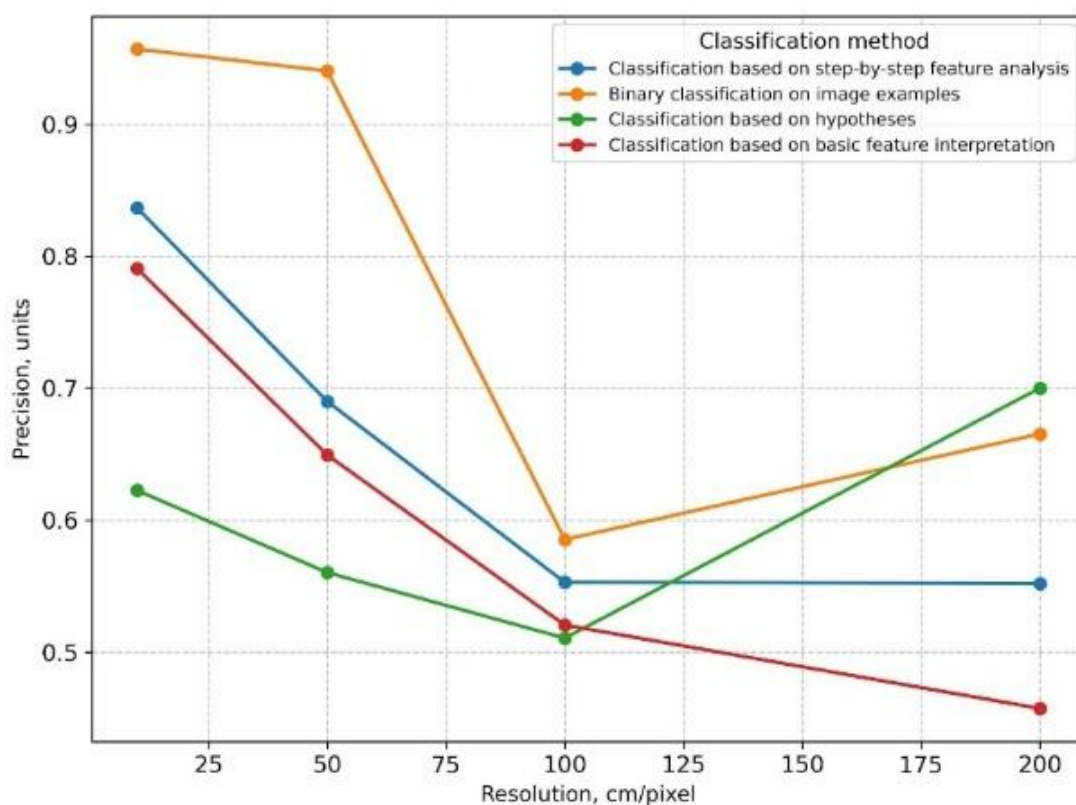


Figure 1. Classification strategy precision at various spatial resolutions

A promising direction for further research is the application of the proposed prompt strategies to other types of target objects in aerial imagery, as well as the integration of multimodal LLM-based detection with traditional segmentation approaches to improve classification accuracy across a wider range of spatial resolutions. Additionally, investigating the effect of prompt chaining and multi-step reasoning techniques on detection performance may yield further improvements, particularly for medium-resolution images where current strategies exhibit the greatest variance in results.

REFERENCES

1. Arnaudo E., Blanco G., Monti A., Bianco G., Monaco C., Pasquali P., Dominici F. A Comparative Evaluation of Deep Learning Techniques for Photovoltaic Panel Detection From Aerial Images. IEEE Access. 2023. Vol. 11. P. 47579–47594. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3275435>.
2. OpenAI. GPT-4o System Card. 2024. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2410.21276>.
3. Shapovalova S., Holovakin M. Prompt Strategies for Multimodal LLM-Based Rooftop Solar Panel Detection, Zenodo. 2026. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.18670195>.
4. Land Nordrhein-Westfalen, Geobasis NRW. Digital Orthophotos via WMS Service (WMS NW DOP). 2024. URL: https://www.wms.nrw.de/geobasis/wms_nw_dop.

ХАРАКТЕРИСТИКИ МОМЕНТУ ВТОРИННОЇ ВІТРОТУРБІНИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ

Г. М Стрункін.¹

магістр, інженер, ТОВ «Плутон ІС»,
вул. Новобудов, 5, м. Запоріжжя, 69076, Україна,
e-mail: strunkingleb@gmail.com

Для розробки вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням для узгодження генератора та вторинної вітротурбіни потрібно знати її механічну характеристику. З використанням описаної раніше моделі такої вітроенергетичної установки отримано механічні характеристики вторинної вітротурбіни у відносних одиницях.

Ключові слова: вітроенергетична установка, аеродинамічне мультиплікування, механічна характеристика, первинний вітровий потік, вторинна вітротурбіна, момент.

TORQUE CHARACTERISTICS OF THE SECONDARY WIND TURBINE OF A WIND POWER PLANT WITH AERODYNAMIC MULTIPLICATION

H. M. Strunkin¹

Master of Engineering, Engineer, Pluton IC LLC,
Novobudov St., 5, Zaporizhzhia, 69076, Ukraine,
e-mail: strunkingleb@gmail.com

To develop a wind power plant with aerodynamic multiplication for matching the generator and the secondary wind turbine, it is necessary to know its mechanical characteristics. Using the previously described model of such a wind power plant, the mechanical characteristics of the secondary wind turbine in relative units were obtained.

Key words: wind power plant, aerodynamic multiplication, mechanical characteristic, primary wind flow, secondary wind turbine, torque.

ORCID: ¹0009-0009-1719-4132.

Для підвищення ефективності ВЕУ розробники прагнуть виключити з конструкції механічний мультиплікатор [1]. Таке рішення підвищує довговічність та екологічність установок, знижує рівень шуму й спрощує технічне обслуговування. Як альтернатива механічним мультиплікаторам, наразі активно досліджується метод аеродинамічного мультиплікування (АДМ) [2]. Для розрахунку характеристик генераторів розробнику потрібно знати механічну характеристику вторинної вітротурбіни при різних швидкостях первинного вітрового потоку. **Метою** даної роботи є отримання механічних характеристик вторинної вітротурбіни у відносних одиницях.

На рис. 1 наведено схему ВЕУ з АДМ [2]. прийняті позначення: 1 – лопаті первинної вітро-турбіни; 2 – гондола з генератором та електрообладнанням; 3 – вторинні вітротурбіни; 4 – опора; R_z – радіус закріплення вторинної вітротурбіни; H – висота вісі первинної вітротурбіни.

Модель вітротурбіни з АДМ у відносних одиницях для розрахунку її потужності було отримано в роботі [3]. За базисні величини прийнято параметри первинної вітротурбіни. В цій роботі також було отримано рівняння для опису

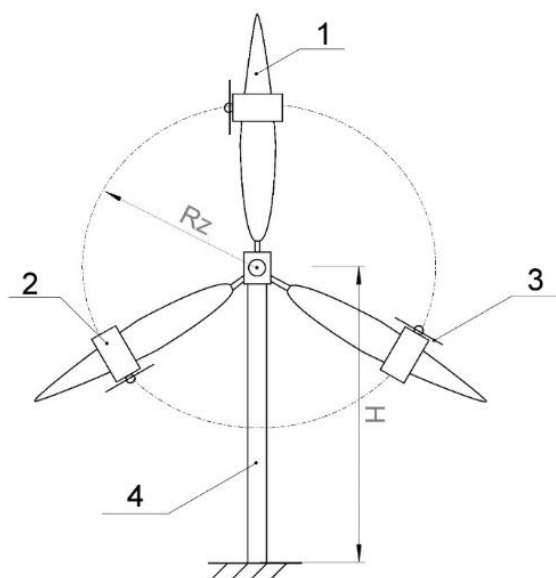


Рис. 1

механічної характеристики вторинної вітротурбіни, що відповідала максимальній потужності. Але характеристики моменту вторинної вітротурбіни $M_{BT2}^*(\omega_2^*, V_1^*)$ від її кутової швидкості обертання ω_2^* при різних швидкостях первинного вітрового потоку V_1^* залишилися неоглянутими.

На Рис. 2 наведено характеристики характеристики моменту вторинної вітротурбіни $M_{BT2}^*(\omega_2^*, V_1^*)$. Також на графіку нанесено криву $M_{BT2}^*(\omega_2^*)$, яка відповідає максимуму потужності вторинної вітротурбіни [3].

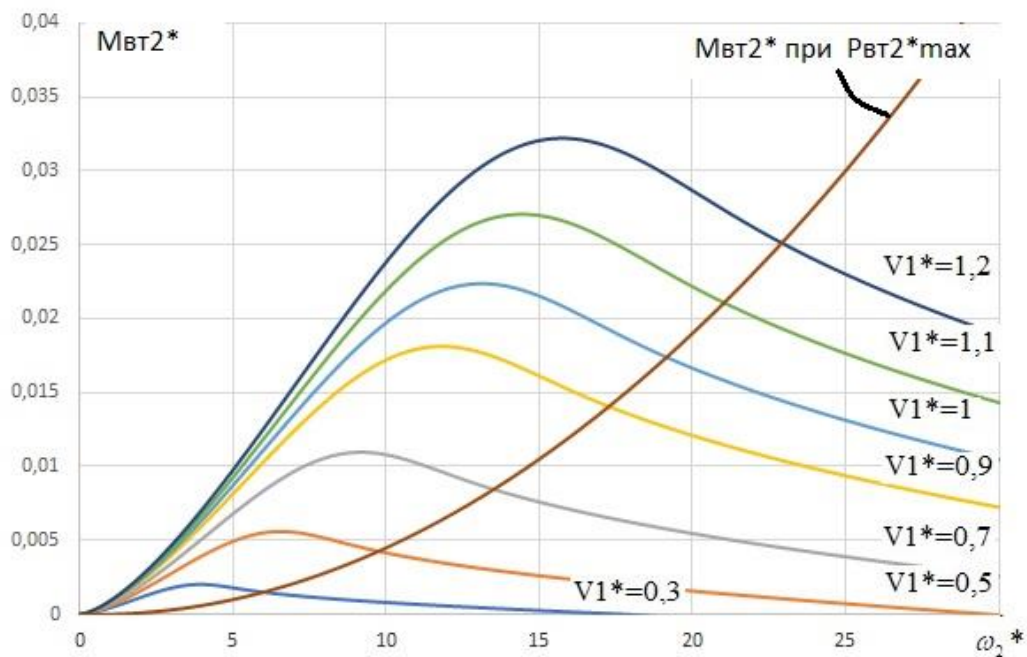


Рис. 2

Аналізуючи графік, можна помітити, що максимум моменту вторинної вітротурбіни спостерігається на етапі розгону вітротурбіни, а при максимальній потужності момент зменшується. В цілому, залежність моменту вторинної вітротурбіни вітроенергетичної установки з АДМ від її кутової швидкості має квадратичний характер. Для опису характеристик надалі зручно використовувати двофакторні регресійні моделі [4], але це тема подальшої роботи.

Висновки. В роботі побудовані графіки механічної характеристики вторинної вітротурбіни вітроенергетичної установки з аеродинамічним мультиплікуванням при різних швидкостях первинного вітрового потоку.

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/lis.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. Алексієвський, Д.Г., Манаєв, К.В., & Стрункін, Г.М. (2025). ТЕОРЕТИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОТУЖНОСТІ ВТОРИННОЇ ВІТРОТУРБІНИ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АЕРОДИНАМІЧНИМ МУЛЬТИПЛІКУВАННЯМ. Відродження енергетика, 1(80), 82-91. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1\(80\).82-91](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.1(80).82-91).
4. S. Siva Suriya Narayanan, V. Yuvaraju and S. Thangavel, "Regression Analysis in Electrical Engineering Applications: A Machine Learning Approach," 2023 International Conference on Signal Processing, Computation, Electronics, Power and Telecommunication (IConSCEPT), Karaikal, India, 2023, pp.1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/IConSCEPT57958.2023.1017035>

ВПЛИВ ГРАНИЧНОГО ЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТА ВИКОРИСТАННЯ НОМІНАЛЬНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА РЕЗУЛЬТАТИ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ УКРАЇНИ

К. В. Петренко¹, І. В. Іванченко²

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143
тел. +38(067) 129-07-43, e-mail: katernkapetrenko@gmail.com

У роботі досліджено вплив порогового значення коефіцієнта використання номінальної потужності (КВНП) на результати оцінки технічного потенціалу встановленої потужності та виробітку електричної енергії вітровими електричними станціями (ВЕС) України. Встановлено, що підвищення порогового значення КВНП від 0.2 до 0.4 призводить до зменшення технічного потенціалу встановленої потужності з 726 ГВт до 90 ГВт, а потенціалу виробітку електроенергії — з 1595 до 290 ТВт·год/рік. Отримані результати підтверджують критичний вплив обраного критерію КВНП на результати оцінки технічного потенціалу встановленої потужності та виробітку електричної енергії ВЕС території та необхідність обґрунтування його значення.

Ключові слова: вітроенергетика, вітрова електростанція, КВНП, технічний вітроенергетичний потенціал.

IMPACT OF THE CAPACITY FACTOR THRESHOLD ON THE TECHNICAL POTENTIAL ASSESSMENT RESULTS OF WIND POWER PLANTS IN UKRAINE

K. Petrenko¹, I. Ivanchenko²

Institute of Renewable Energy, NAS Ukraine,
Metrolohična street, 50 Kyiv, Ukraine, 03143
Tel:+38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net

The study investigates the influence of the capacity factor threshold on the assessment results of the technical potential of installed capacity and electricity generation of wind power plants (WPPs) in Ukraine. It was established that increasing the capacity factor threshold from 0.2 to 0.4 leads to a reduction in the technical potential of installed capacity from 726 GW to 90 GW, and in the electricity generation potential from 1595 to 290 TWh/year. The obtained results confirm the critical impact of the selected capacity factor value on the assessment results of the installed capacity and electricity generation technical potential of WPPs and highlight the necessity of substantiating its selected value.

Keywords: wind energy, wind power plants, capacity factor, technical wind energy potential.

ORCID: ¹0009-0004-4658-9946; ²0000-0002-5083-4180.

Вимоги інвесторів до коефіцієнта використання номінальної потужності (КВНП) вітроелектростанцій (ВЕС) за останні 20 років зазнали суттєвих змін, що пов'язано з еволюцією самої галузі, глобальними енергетичними трендами та зміною економіки відновлюваних джерел енергії. Якщо на початку 2000-х років головним критерієм для інвесторів була наявність державної підтримки у вигляді «зелених» тарифів чи прямих субсидій, то питання КВНП часто відходило на другий план. Однак із розвитком технологій, здешевленням вітрових турбін, підвищенням конкуренції на ринку ВДЕ та поступовим зменшенням державної підтримки у вигляді прямих дотацій інвестори почали висувати до проєктів більш жорсткі вимоги щодо ефективності. КВНП став ключовим індикатором фінансової життєздатності ВЕС, оскільки без гарантованих тарифів від нього безпосередньо залежить приведена собівартість виробленої електроенергії (LCOE), термін окупності та рентабельність інвестицій. Крім того, дедалі більшого значення набуває здатність ВЕС стабільно забезпечувати генерацію при нестабільному вітровому режимі, що також відображається у значеннях КВНП. Тому нині він сприймається не лише як технічний параметр, а як комплексний показник, що враховує інженерні рішення, вибір локації, фінансову модель і навіть соціально-екологічні аспекти проєкту.

В ході дослідження [1], основні результати якого опубліковані в Атласі відновлюваних джерел енергії [2] було розроблено методику оцінювання потенціалу доступних площ та технічного потенціалу встановленої потужності і середньорічного виробітку електричної енергії ВЕС, що базується на застосуванні геоінформаційних систем. Запропонований підхід до визначення вітроенергетичного потенціалу включає в себе:

- врахування чинної нормативно-правової бази України та європейських країн в електроенергетичній і природоохоронній сферах для оцінки існуючих обмежень щодо вибору ділянок для розміщення ВЕС з наступним визначенням територій що є доступними для будівництва ВЕС;
- валідацію кліматичних даних швидкості вітру мережі метеостанцій (МС) України, визначення переліку репрезентативних МС, аналіз рівномірності їх розподілу по території та побудову діаграми Вороного для репрезентативних МС;
- визначення параметрів вітроелектричної установки (ВЕУ) та вибір схем розстановки ВЕУ по території відповідно до фактору наявності або відсутності переважаючого напрямку вітру на кожній окремій МС [3];
- визначення технічного потенціалу встановленої потужності та річного виробітку ВЕС для території України.

При переході від потенціалу доступних площ до технічного потенціалу вітроенергетичних ресурсів, доступні площі необхідно обмежити технічними можливостями їх використання. Обмежуючим фактором може слугувати середня швидкість вітру, КВНП ВЕС, клас вітропотенціалу або площа доступної ділянки. В [1] за обмежуючий фактор вибрано саме КВНП ВЕС.

В ході даного дослідження, КВНП ВЕС був розрахований за строковими даними 70 МС України за період 2011-2020 рр. з використанням кривої потужності ВЕУ 5.6 МВт з діаметром вітроколеса 162 м та висотою осі ротора 120 м.

Для визначення технічного потенціалу вітроенергетичних ресурсів, потенціал доступних площ для будівництва ВЕС було обмежено за показником КВНП ≥ 0.2 . При цьому частка доступних площ зменшилася із 21.9% (132 372 км²) до 14.4% (95 954 км²). При обмеженні КВНП ≥ 0.25 – цей показник зменшується до 8.2% (51 884 км²) [1]. При цьому, застосування останнього обмеження зменшило потенціал таких областей як Сумська і Чернігівська до 0, тоді як при використанні обмеження КВНП ≥ 0.2 , частка доступних площ в Сумській області становила 1.6%, а в Чернігівській – 4.9%.

Якщо провести послідовне обмеження території за показником КВНП не нижче ніж 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4 в межах кожної комірки Вороного, то за показником потенціалу встановленої потужності ВЕС отримані значення відрізнятимуться в 8 разів, а за показником середньорічного виробітку – в 5.5 разів (рис. 1-2).

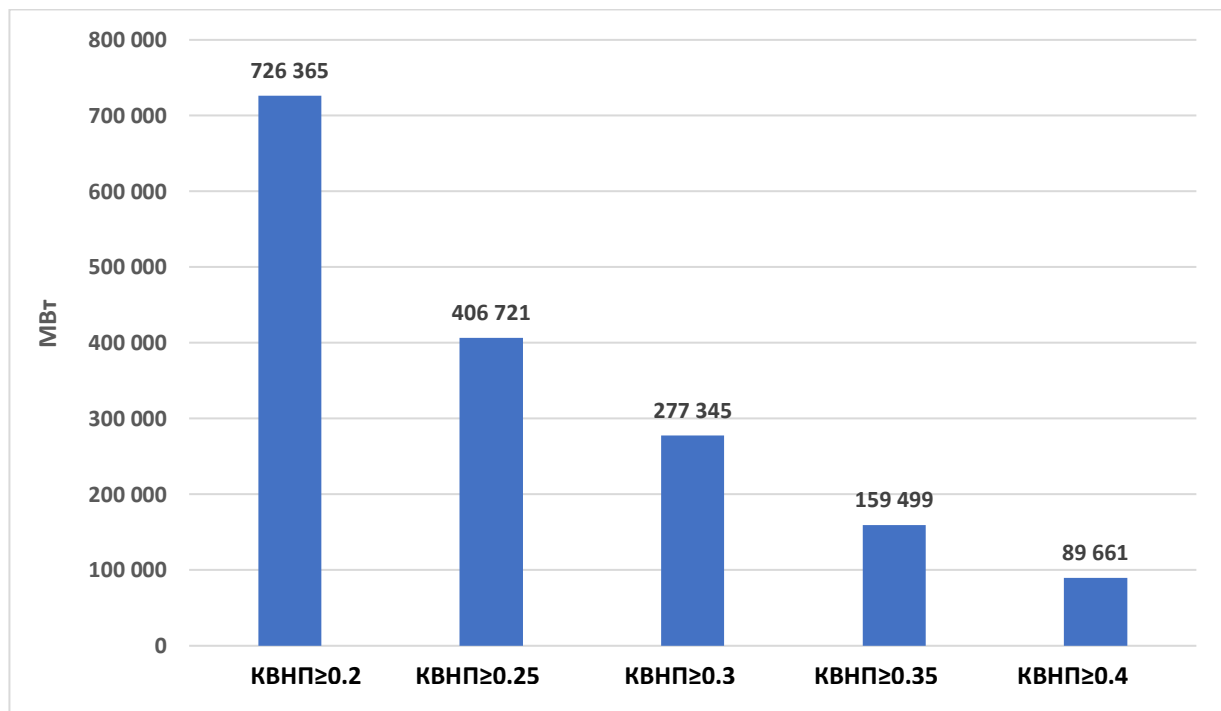


Рис. 1. Залежність потенціалу встановленої потужності ВЕС території України від порогового значення КВНП ВЕС

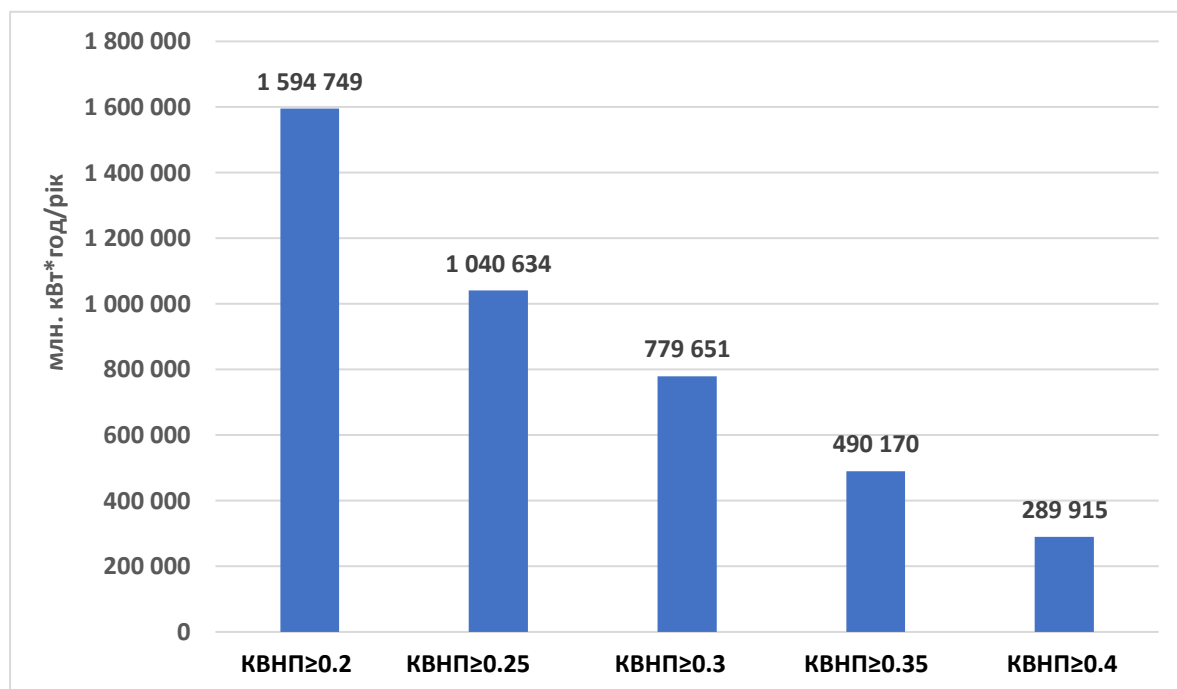


Рис. 2 Залежність потенціалу середньорічного виробітку електричної енергії ВЕС території України від порогового значення КНВП ВЕС

Як видно з наведених рисунків, при пороговому значенні КНВП ≥ 0.2 технічний потенціал встановленої потужності ВЕС на території суходолу України становить близько 726 ГВт, потенціал середньорічного виробітку електроенергії ВЕС — майже 1 595 млрд кВт·год, а при КНВП ≥ 0.4 відповідні показники становлять близько 90 ГВт та 290 млрд кВт·год відповідно.

Таким чином підвищення порогового значення КНВП ВЕС при розрахунку вітроенергетичного потенціалу території від 0.2 до 0.4 може призвести до різниці в показнику потенціалу встановленої потужності в 8 разів і потенціалу середньорічного виробітку електричної енергії ВЕС в 5.5 разів.

Отримані результати свідчать про визначальний вплив порогового значення КНВП на результати оцінки технічного потенціалу встановленої потужності та середньорічного виробітку електричної енергії ВЕС території. Показано, що вибір значення даного критерію безпосередньо впливає на величину оціненого потенціалу та перелік територій, що вважаються придатними для розміщення ВЕС. Це підтверджує необхідність обґрунтованого та прозорого визначення порогового значення КНВП ВЕС при оцінюванні технічного потенціалу, оскільки його вибір суттєво впливає на результати енергетичного планування, інвестиційну привабливість проектів та стратегічні рішення щодо розвитку вітроенергетики.

ПОСИЛАННЯ

- 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://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).68-81](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).68-81)
- 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
- ГКД 341.003.001.002-2000. Правила проектування вітрових електричних станцій / Жовмір М.М., Симонов А.С. та інші. - Строк перевірки 2004 р. - Київ: Мінпаливноенерго України, 2001. - 52 с.

УДК 621.039.533.6, 621.548, 621.311.24

ОЦІНЮВАННЯ ПРИДАТНОСТІ ТЕРИТОРІЙ ДЛЯ РОЗМІЩЕННЯ ВІТРОВИДНЕВИХ ПІДПРИЄМСТВ

С. О. Кудря¹, М. А. Ткаленко², Л. В. Яценко³

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143
тел. +38(044) 206-28-09, e-mail: renewable@ukr.net*

Розроблено критерії оцінювання придатності територій для потенційного розміщення об'єктів вітровидневої енергетики на початкових стадіях їх проектування.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроустановка, електроліз, водень.

ASSESSMENT OF THE SUITABILITY OF TERRITORIES FOR THE LOCATION OF WIND HYDROGEN ENTERPRISES

Kudrya S.¹, Tkalenko M.², Yatsenko L.³

*Institute of Renewable Energy, National Academy of Science of Ukraine, Metrolozhichna 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: ¹0000-0002-4798-6853, ²0000-0003-0698-5739, ³0000-0001-7022-1579.

Оцінювання придатності територій для потенційного розміщення об'єктів вітровидневої енергетики на початкових стадіях проектування потребує визначення та врахування ряду вимог, дотримання яких дозволяє встановити найбільш вигідне місце для розміщення об'єктів, де всі компоненти проекту будуть функціонувати найбільш ефективно із врахуванням всіх технічних, економічних та екологічних аспектів тощо. У рамках виконання відділом вітроенергетики Інституту відновлюваної енергетики НАН України науково-дослідної роботи «Розробити наукові заходи багатофакторного кадастру інформації для оптимізації розміщення в Україні підприємств вітровидневої енергетики» визначено основні критерії оцінки придатності земельних ділянок для вітровидневих підприємств, класифікація та деталізація яких представлені нижче.

Технічні критерії [1, 2]:

- наявність вітрових ресурсів, необхідних для ефективної роботи вітрової та електролізної установок;
- наявність та доступність водних ресурсів – для дотримання безперервного процесу електролітичного розкладу води важливим є розміщення вітровидневих підприємств поблизу достатніх водних ресурсів;
- наявність достатньої площі для розміщення вітроелектричних установок, електролізних установок та всієї супутньої інфраструктури;
- відсутність правових та інших обмежень – земельна ділянка не повинна знаходитись у природоохоронних зонах, зонах історичної спадщини тощо згідно законодавства України.

Екологічні критерії [3]:

- земельна ділянка повинна відповідати екологічним вимогам у галузі вітроенергетики;
- відбір водних ресурсів не повинен порушувати екологічні стандарти як певної місцевості, так і довкілля загалом;
- функціонування обладнання вітровидневих підприємств та їх інфраструктури повинно відповідати екологічним стандартам.

Економічні критерії:

- наявність на даній ділянці можливостей зниження витрат при впровадженні проектів (будівництво, транспортування, обслуговування, логістика тощо);
- наявність сприятливого базису для створення інфраструктури – всіх необхідних мереж для вітровидневих підприємств;

- доступ до споживачів – розміщення ділянки поблизу споживачів водню або транспортних вузлів для зменшення витрат на транспортування;
- інвестиційна привабливість – впровадження проєкту на ділянці повинно бути привабливим для інвесторів, мати сприятливе оподаткування та можливість отримання фінансової підтримки.

Соціальні критерії:

- підтримка проєкту з боку місцевих громад, мінімізація соціальних конфліктів тощо;
- проєкт повинен створювати нові робочі місця для місцевого населення та сприяти соціально-економічному розвитку регіону;
- безпека та здоров'я – забезпечення безпеки для працівників та місцевого населення, а також мінімізація впливу на здоров'я людей.

При розробці проєкту вітроводневого підприємства проводиться оцінка впливу на довкілля (ОВД), тобто комплексна оцінка та аналіз потенційного впливу запланованої господарської діяльності на природне, соціальне та техногенне середовище. Її метою є виявлення, оцінка та, за можливості, нейтралізація або мінімізація негативних наслідків ще до реалізації проєкту, забезпечуючи прийняття екологічно обґрунтованих рішень. Процедура ОВД в Україні регулюється Законом «Про оцінку впливу на довкілля» від 23 травня 2017 року № 2059-VIII і є обов'язковою для видів діяльності, що можуть мати значний вплив на довкілля, до них належать також промислове та енергетичне будівництво [3].

При впровадженні вітроводневих підприємств основним енергетичним ресурсом діяльності підприємства є електроенергія, отримана від вітоелектричної установки. Економічна ефективність ВЕУ визначається наступним чином: обґрунтування параметрів ВЕУ, її розмірів, типу, можливої кількості електроенергії, що виробляється на основі техніко-економічних розрахунків та інженерного проєктування з урахуванням вимог споживача, його структури електрогосподарства, зв'язку з енергосистемою, кількості споживаної електроенергії, витрат на оплату цієї енергії, а також місця розташування об'єкта енергопостачання та природно-кліматичних характеристик в цьому районі. Загалом економічна ефективність вітроводневих підприємств визначається вартістю виробленого водню і значною мірою залежить від вартості електроенергії, виробленої вітрогенератором. При розробці проєктів враховується багато чинників, а саме: вартість вітрових турбін, електролізерів, водневого сховища та інтеграція в мережу споживачів, а також від ціни на електроенергію, що надходить від вітрогенераторів, і ринкової вартості водню тощо.

Методика розрахунку економічної ефективності виробництва водню на вітроводневих підприємствах ґрунтується на визначенні LCOH (Levelized Cost of Hydrogen). LCOH, або середньозважена вартість водню, є ключовим показником для оцінки витрат на виробництво 1 кілограма водню протягом усього життєвого циклу проєкту або протягом року. Цей показник дозволяє порівнювати різні технології електролізу та проєктувати економічну доцільність виробництва водню. Метод розрахунку на основі LCOH є універсальним інструментом для аналізу економічної ефективності проєктів із виробництва водню. Він дозволяє врахувати всі ключові витрати, пов'язані з виробництвом, і зробити висновки про доцільність впровадження водневих технологій у різних умовах. Показник вирівняної вартості водню LCOH дозволяє розрахувати витрати на виробництво водню за допомогою низькотемпературного електролізу води (лужного або PEM) у різних країнах ЄС-27, Норвегії та Великобританії. Розроблено калькулятор, у якому надається вибір із чотирьох різних джерел електроенергії (оптова, фотоелектрична та наземна або офшорна вітрова). Калькулятор дозволяє використовувати значення за замовчуванням, надані Hydrogen Europe, або значення, визначені користувачем. Функціональні можливості калькулятора LCOH і методологія, що лежить в його основі, детально пояснюються в розробленому посібнику, базовим є 2024 рік для значень капітальних витрат електролізера та всіх даних про джерело електроенергії [4].

Врахування основних вимог згідно представлених критеріїв, що включають показники вітрової активності та доступ до водних ресурсів, близькість до споживачів водню, відсутність конфліктів інтересів та високу прийнятність для місцевих громад, а також економічну ефективність від реалізації проєктів та сприятливе інвестиційне середовище, забезпечує прийняття обґрунтованих рішень щодо придатності територій для впровадження вітроводневих підприємств.

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. Закон України про оцінку впливу на довкілля [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2059-19#text>
4. Levelised Cost of Hydrogen Calculator [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://observatory.clean-hydrogen.europa.eu/tools-reports/levelised-cost-hydrogen-calculator>

ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИБЕРЕЖНИХ ТА ОФШОРНИХ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ В АЗОВО-ЧОРНОМОРЬСЬКОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ З ВИКОРИСТАННЯМ БАЗИ ДАНИХ RE DATA EXPLORER

І. Л. Мазуренко

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (066) 100-25-71, e-mail: irynalmazurenko@gmail.com

Проведено числовий експеримент з визначення досяжного річного значення енергетичної ефективності та характеристик нерівномірності генерування потужності прибережними та офшорними станціями протягом року в Азово-Чорноморському регіоні України з використанням бази даних швидкості вітру RE Data Explorer.

Ключові слова: швидкість вітру, вітроелектростанція, енергетична ефективність, потужність, нерівномірність.

ASSESSMENT OF ENERGY EFFICIENCY OF COASTAL AND OFFSHORE WIND POWER PLANTS IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF UKRAINE USING THE RE DATA EXPLORER DATABASE

I. L. Mazurenko

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolozhichna Str., Kyiv, 03143, Ukraine,
phone: (066) 100-25-71, e-mail: irynalmazurenko@gmail.com

A numerical experiment was conducted to evaluate the potential annual energy efficiency and power generation variability of coastal and offshore wind plants in Azov-Black Sea region of Ukraine. The study utilized wind speed data from the RE Data Explorer database.

Key words: wind speed, wind farm, energy efficiency, power, unevenness.

ORCID: 0000-0002-0146-7396

Реалізація проектів потужних вітроелектричних станцій (ВЕС) в Азово-Чорноморському регіоні України потребує точних оцінок енергетичної ефективності, в порівнянні з зазначеними у відповідних атласах потенціалу вітрових ресурсів, котрі можуть слугувати основою лише для вибору перспективних територій та формування стратегічних планів розвитку вітроенергетики. Зменшення енергетичної ефективності ВЕС на (20-25)% від очікуваного значення може слугувати причиною непривабливості або неконкурентноспроможності проєкта. Результат кількісної оцінки енергетичної ефективності залежить переважно від достовірності багаторічних розподілів швидкості вітру на висоті осі ротора. Для зазначеного регіону розподіли швидкості вітру можуть бути отримані лише шляхом математичного моделювання, оскільки результати багаторічних інструментальних вимірювань відсутні і на сьогодні достовірне визначення енергетичної ефективності ВЕС в регіоні на етапі проведення передпроектних досліджень є проблематичним внаслідок невизначеності параметрів ймовірнісних розподілів та вертикального профілю швидкості вітру. Тому для оцінки енергетичної ефективності прибережних та офшорних ВЕС в Азово-Чорноморському регіоні України актуальним є вирішення низки задач щодо вибору баз даних швидкості вітру на робочих висотах вітротурбін та з урахуванням результатів інструментальних вимірювань швидкості вітру.

Числовий експеримент проведено для двох прибережних локацій на Чорному і Азовському морях (L_M , L_Z) та в місці розташування віртуальної офшорної стаціонарної ВЕС в Чорному морі (локація L_{BS}) з висотою центра обертання ротора вітротурбіни 100 м над середнім рівнем земної (морської) поверхні. Енергетичну ефективність використання ВЕС оцінено по значенню Capacity factor (CF), який розраховується у відносних одиницях (відсотках) і слугує універсальним показником для станцій довільної потужності [1].

Визначення енергетичної ефективності ВЕС виконано для прибережних локацій шляхом розрахунку CF з використанням параметрів ймовірнісного розподілу швидкостей вітру за період 2018-2022 рр., отриманих з бази даних RE Data Explorer [2], що являє собою продукт моделювання з використанням результатів супутникового та дистанційного зондування атмосфери, та інструментальних вимірювань і наведено в табл. 1. Отримані результати засвідчують, що для прибережних територій досягне значення CF , розраховане за даними бази RE Data Explorer, менше, ніж за результатами інструментальних вимірювань на 26% для локації L_M та на 16 % для локації L_Z . Зазначимо, що

досягне значення CF за даними бази RE Data Explorer для локації в Чорному морі (L_{BS}) навіть дещо менше, ніж для прибережних ВЕС за результатами інструментальних вимірювань, що вказує на наявність занижених значень швидкостей вітру в базі RE Data Explorer для локацій в морських акваторіях. Доцільно зазначити, що отримані в процесі дослідження показники CF для двох прибережних ВЕС узгоджуються з результатами їх експлуатації, висвітлених в річних звітах відповідних енергетичних компаній, зокрема [3].

Таблиця 1. Параметри ймовірнісних розподілів швидкості вітру на висоті 100 м за період 2018-2022 рр.

Локація L_M				Локація L_Z				Локація L_{BS} (46°27' N; 31°11' E)			
Параметри розподілу			CF	Параметри розподілу			CF	Параметри розподілу			CF
$\bar{v}$, м/с	α , м/с	β		$\bar{v}$, м/с	α , м/с	β		$\bar{v}$, м/с	α , м/с	β	
База даних RE Data Explorer											
6.603	7.43	2.455	0.269	7.115	7.964	2.2	0.316	7.516	8.4845	2.2	0.356
Експериментальні дані								Припущення			
7.584	8.553	2.445	0.362	7.737	8.733	2.328	0.375	8,0	9.0321	2.2498	0.397

Результати розрахункових досліджень імовірнісної забезпеченості потужності $\bar{P}_s(z)$ прибережних та віртуальної офшорної станцій, що характеризують нерівномірність процесу генерування електроенергії протягом року, проілюстровано на рис. 1. Вони засвідчують, що за умовами вітрового режиму в регіоні станції будуть генерувати електроенергію протягом 7780 годин за рік. Тривалість роботи ВЕС з максимальною потужністю очікується для прибережних локацій близько 1000 годин, а для офшорної локації близько 1400 годин за рік. Функціонування станцій з потужністю більше 60% номінального значення триватиме для прибережних локацій L_M та L_Z і офшорної локації L_{BS} відповідно 2300, 2500, 2800 годин протягом року. Оцінка тривалості інших рівнів генерування потужності може бути визначена аналогічним чином.

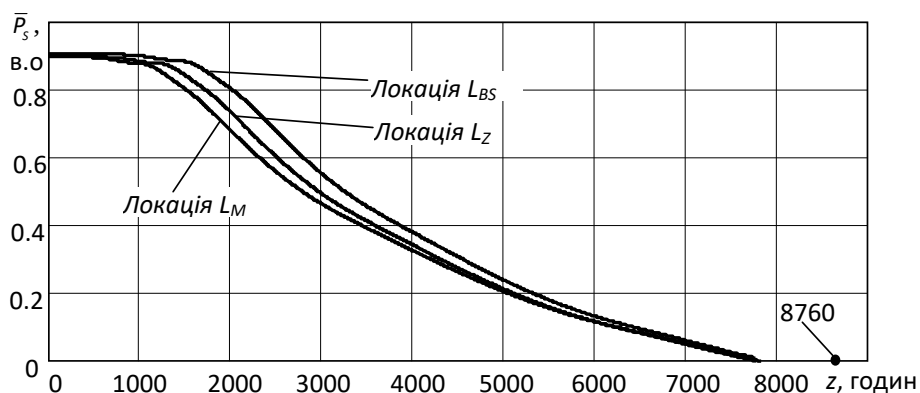


Рис. 1. Імовірнісна забезпеченість потужності прибережних та офшорної ВЕС на річному інтервалі часу.

Як висновок, зазначимо, що отримані результати для різних локацій засвідчили визначальну роль середньорічного значення швидкості вітру для досягнення необхідного рівня енергоефективності ВЕС. Значення параметрів масштабу та форми функції диференційної щільності ймовірнісного розподілу впливають лише на інтенсивність досягнення максимального значення CF та характеризують нерівномірність процесу генерування потужності впродовж року. Основною інформацією для визначення параметрів ймовірнісного розподілу швидкостей вітру в регіоні може слугувати багаторічна база даних відновлюваних енергетичних ресурсів RE Data Explorer. Проте для розвитку офшорної вітроенергетики в Азово-Чорноморському регіоні вона потребує корегування на основі результатів короткотривалих (протягом одного – двох років) інструментальних вимірювань швидкості вітру висотах розміщення центра обертання ротора, передбачуваних для використання вітротурбін. За якісного виконання вітроенергетичних проектів для Азово-Чорноморського регіону України річні значення Capacity factor можуть сягати рівня 36% для прибережних ВЕС, та 40% для офшорних ВЕС.

ПОСИЛАННЯ

22. Boccard N. Capacity factor of wind power realized values vs. estimates. SSRN Electronic Journal. Energy Policy. 37 (2009). 2679–2688. DOI: 10.2139/ssrn.1285435.
23. <https://www.re-explorer.org> (дата звернення: 20.11.2025).
24. https://dtek.com/content/announces/pdf/dtek_ar_2020_ua_web_plus_s1179_t4359_i6036.pdf (дата звернення: 14.02.2026).

ВІДЦЕНТРОВІ РЕГУЛЯТОРИ РОТОРІВ ДЛЯ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

М.О. Шихайлов¹, В.П. Коханевич²,

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 50

тел./факс 044-206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Наведено досвід розробки відцентрових регуляторів роторів для вітроелектричних установок малої потужності в Інституті відновлюваної енергетики НАН України.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроелектрична установка, відцентровий регулятор.

CENTRIFUGAL ROTOR REGULATORS FOR SMALL-POWER WIND TURBINES

M.O. Shikhaylov¹, V.P. Kokhaneyich²,

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

03143, Kyiv, Metrologicalhna St., 50

tel./fax 044-206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

The experience of developing centrifugal rotor regulators for small-power wind power plants at the Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine is presented.

Key words: wind energy, wind power plant, centrifugal regulator.

ORCID: ¹0000-0003-1845-9904; ² 0000-0003-0033-1355

Вітроелектричні установки (ВЕУ) малої потужності перш за все характеризуються високим значенням кутової швидкості ротора. Це означає, що на всі елементи ротора, включаючи самі лопаті, під час обертання діють значні відцентрові сили. Тому для обмеження кутової швидкості ротора в них широко застосовуються відцентрові регулятори роторів ВЕУ різних конструкцій.

Інститут відновлюваної енергетики НАН України (ІВЕ НАНУ) накопив значний досвід в розрахунку проектуванні та дослідженні даного типу регуляторів. Одним з перших був спроектований та виготовлений експериментальний зразок відцентрового регулятора для ВЕУ з діаметром ротора 2 м і потужністю 200 Вт (рис. 1). Специфікою даної конструкції було те, що в ній можна було використовувати регулювання, як в сторону збільшення кутів установки лопаті (флюгерне регулювання), так і в сторону зменшення кутів установки (антифлюгерне регулювання). Також конструкція регулятора дозволяла змінювати різні параметри його налагодження, а саме: жорсткість пружини регулювання та її початковий натяг; масу відцентрових тягарців та їх відстань від осі обертання лопаті; кути установки відцентрових тягарців та кривошипа відносно хорди лопаті. Відповідно при зміні вище згаданих параметрів були проведені дослідження за різних швидкостей повітряного потоку та отримані статичні характеристики регулятора. Експериментальні дані були оброблені та співставлені з теоретичними дослідженнями, що наведено в роботі [1].

Також необхідно зазначити, що були проведені також динамічні випробування даного регулятора при раптовій зміні навантаження та швидкості вітру, також наведено в [1]. Як при статичних, так і при динамічних випробуваннях регулятора була підтверджена правильність запропонованих математичних моделей даного типу відцентрових регуляторів ВЕУ, що лягло в основу проектування наступних моделей різної потужності та з різними параметрами.

Теоретичні та експериментальні напрацювання були використані при проектуванні ВЕУ-4-6,5 потужністю 4 кВт та діаметром ротора 6,5 м (рис.2), що був виготовлений на дослідному виробництві Харківського Інституту загального машинобудування ім. Підгорного.

Однією з оригінальних конструкцій, що були розроблені в ІВЕ НАНУ був відцентровий регулятор в конструкції якого замість спіральних пружин був використаний пакет пускових та пружин регулювання пакет плоских пружин [2]. Така конструкція регулятора була використана в дослідному зразку вітроелектричної установки УВГ-5. Випробування і дослідження УВГ-5 були проведені в натурних умовах в селі Широка Гребля Вінницької області.



Рис.1. Загальний вигляд відцентрового регулятора та ВЕУ потужністю 200Вт



Рис. 2. Загальний вигляд відцентрового регулятора та ВЕУ-4-6,5

Порівнюючи відцентрові регулятори з спіральними та плоскими пружинами можна зробити наступні висновки. Регулятор з плоскими пружинами дозволяють зменшити осьові габарити регулятора, але потребують високотехнологічного обладнання для виготовлення конічних шестерень. Крім цього також необхідно зазначити, що технологія виготовлення спіральних пружин доволі відпрацьована і можна прогнозувати їх ресурс, що не можна сказати про плоскі пружини, а відповідно і про надійну роботу ВЕУ з такими регуляторами за весь період її експлуатації.

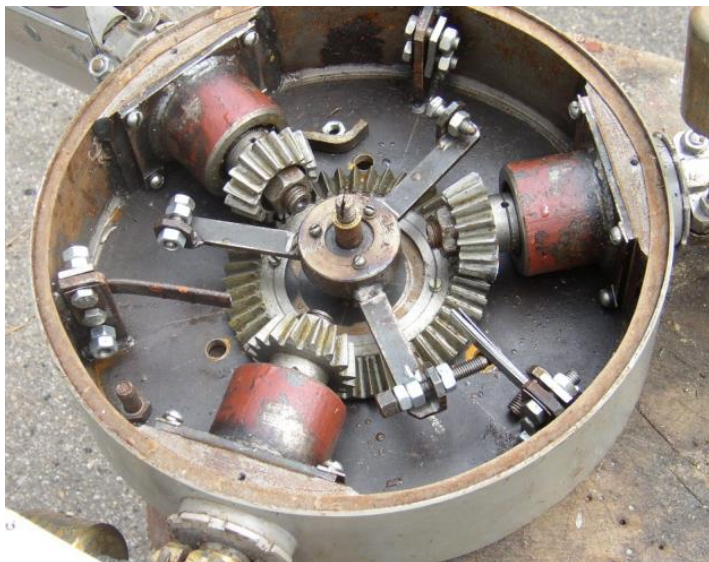


Рис.3. Загальний вигляд відцентрового регулятора та ВЕУ з плоскими пружинами

ПОСИЛАННЯ

1. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Експериментальні дослідження відцентрових регуляторів для вітроустановок. Відрновлювана енергетика, №3(54), 2018, с 31-45.
2. Деклараційний патент України № 28175А, автора Шевченка Ю.В. «Вітроколесо з регулятором», заявка №95041875/23/28 від 25.04.95, опубл., 15.03.90, бюл. №10).

ДЕЯКІ ОСОБЛИВОСТІ МОДУЛЬНОЇ НЕЙРОННОЇ СИСТЕМИ ВІБРОДІАГНОСТИКИ ВІТРОГЕНЕРАТОРІВ

О. В. Кулеш¹, В. М. Зварич^{1,2}

¹Інститут електродинаміки НАН України,
пр.Берестейський, 56, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com
²Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
Вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна

У роботі розглянуто особливості побудови модульної нейронної системи вібродіагностики вузлів вітрогенераторів. Запропоновано архітектуру багаторівневої системи обробки вібраційних сигналів з використанням локальних модулів виділення ознак та основної нейронної мережі для визначення технічного стану обладнання.

Ключові слова: вітроенергетика, вібродіагностика, нейронні мережі, діагностичні ознаки, вітрогенератори.

SOME FEATURES OF THE MODULAR NEURAL SYSTEM FOR VIBRODIAGNOSTICS OF WIND TURBINE GENERATORS

O. V. Kulesh¹, V. M. Zvaritch²

¹Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
56 Beresteyskiy Ave., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (099) 501-79-34, e-mail: zvaritch@gmail.com
²Institute of renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50, Metrolozhichna St., Kyiv, Ukraine, 03143

The paper considers the features of building a modular neural system for vibration diagnostics of wind turbine assemblies. The architecture of a multi-level vibration signal processing system using local feature extraction modules and the main neural network for determining the technical condition of the equipment is proposed.

Key words: autonomous installation, active condensation method, air humidity, obtaining water from air, "dew point" temperature.

ORCID: ²<https://orcid.org/0000-0002-1271-4954>

Вітроенергетика відіграє важливу роль у розвитку сучасної енергетики та є одним із ключових напрямів переходу до використання відновлюваних джерел енергії. Підвищення ефективності роботи вітроенергетичних установок значною мірою залежить від їхньої надійності та своєчасного виявлення дефектів у вузлах обладнання. Тому розробка сучасних систем технічної діагностики вітрогенераторів є актуальною науковою та прикладною задачею.

Одним із перспективних напрямів розвитку таких систем є використання методів штучного інтелекту, зокрема нейронних мереж, які дозволяють аналізувати складні нелінійні залежності між параметрами вібраційних сигналів і технічним станом обладнання. Нейронні мережі широко застосовуються у задачах прогнозування та обробки часових рядів у вітроенергетиці, наприклад, для прогнозування швидкості вітру або генерації електроенергії [1,2].

У даній доповіді пропонується використання модульної архітектури нейронної системи вібродіагностики вітрогенераторів. Такий підхід передбачає багаторівневу обробку вібраційних сигналів, що дозволяє підвищити ефективність аналізу та зменшити обчислювальне навантаження на центральний модуль системи.

На першому рівні системи встановлюються датчики вібрації (акселерометри), які розміщуються на основних вузлах вітрогенератора, таких як трансмісія, головний вал, генератор та інші елементи конструкції. Сигнали з датчиків є часовими реалізаціями випадкових процесів, які містять інформацію про технічний стан обладнання.

На другому рівні виконується попередня обробка сигналів, що включає фільтрацію шумів, нормалізацію амплітуди та сегментацію сигналу на часові вікна. Це дозволяє підготувати сигнали для подальшого аналізу.

Третій рівень системи складається з локальних модулів виділення ознак MiniNN. Кожен такий модуль обробляє сигнал від окремого датчика та виконує перетворення сигналу у частотну або частотно-часову область за допомогою швидкого перетворення Фур'є (FFT), кореляційного або гістограмного аналізу та інш. На основі отриманих оцінок статистичних характеристик обчислюються діагностичні ознаки сигналу, зокрема середньоквадратичне значення (RMS), коефіцієнт ексцесу, коефіцієнт асиметрії, пік-фактор та енергетичні характеристики у визначених частотних діапазонах. Таким чином формується вектор ознак

$$C_i = [f_1, f_2, \dots, f_n]$$

який використовується для подальшої класифікації технічного стану обладнання.

Структура локального модуля MiniNN наведена на рис.1.

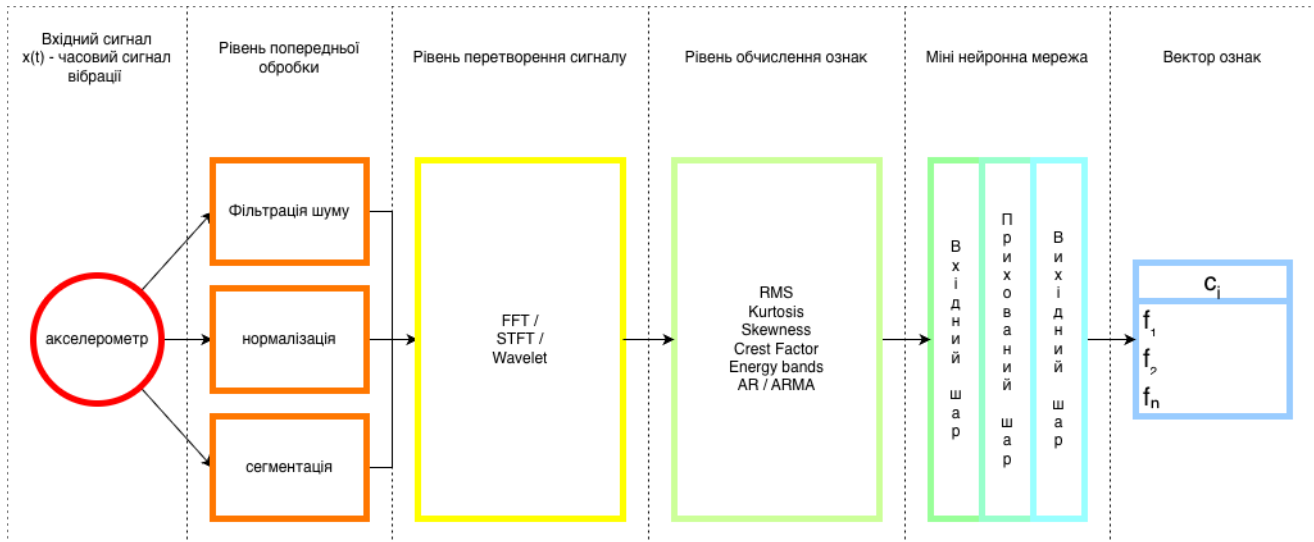


Рис.1. Структура локального модуля MiniNN для обробки вібраційних сигналів.

На наступному рівні системи виконується об'єднання векторів ознак, отриманих з усіх локальних модулів:

$$Z = [c_1, c_2, \dots, c_n]$$

Сформований глобальний вектор ознак подається на вхід основної нейронної мережі, яка виконує класифікацію технічного стану обладнання.

Основна нейронна мережа є багатошаровою мережею прямого поширення сигналу, навчання якої здійснюється методом зворотного поширення помилки (Backpropagation). На виході мережі формується рішення щодо технічного стану вузлів вітрогенератора.

ПОСИЛАННЯ

- Молибг, О., & Балтовський, Ю. (2025). ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ PROPHET ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВІТРОВОГО ПОТОКУ. Відроджена енергетика, (4(83)), 209-226. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4\(83\).209-226](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4(83).209-226) (дата звернення: 16.01.2026).
- Piotrowski, Paweł, Inajara Rutyna, Dariusz Baczyński, i Marcin Kopyt Evaluation Metrics for Wind Power Forecasts: A Comprehensive Review and Statistical Analysis of Errors.. Energies 15, вип. 24 (2022): 9657 URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/24/9657> (дата звернення: 16.01.2026).
- 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. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-44443-3> (дата звернення: 16.01.2026).

УДК 621.548

СТАБІЛІЗАЦІЯ ВІДЦЕНТРОВОГО РЕГУЛЯТОРА РОТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ПРИ АНТИФЛЮГЕРНОМУ РЕГУЛЮВАННІ

В. В. Коханевич

Інститут відновлюваної енергетики НАН України
03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 50
тел./факс 044-206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

Наведено теоретичні передумови та практичну реалізацію стабілізації відцентрового регулятора ротора вітроустановки при антифлюгерному регулюванні.

Ключові слова: вітроенергетика, вітроустановка, відцентровий регулятор, антифлюгерне регулювання.

STABILIZATION OF THE CENTRIFUGAL WIND TURBINE ROTOR GOVERNOR DURING ANTI-FLUGER REGULATION

V. V. Kokhanievich

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine
03143, Kyiv, Metrologicalhna St., 50
tel./fax 044-206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

The paper presents the theoretical background and practical implementation of centrifugal governor stabilization for a wind turbine rotor operating under anti-furling control.

Key words: wind energy, wind turbine, centrifugal regulator, anti-furling regulation.

ORCID: 0009-0009-0461-4388.

Регулювання роторів вітроустановок поворотом лопатей з використанням відцентрових регуляторів може виконуватися двома способами: у сторону збільшення кутів установки лопатей — флюгерне регулювання та у сторону зменшення кутів — антифлюгерне регулювання. При цьому антифлюгерне регулювання в конструктивному плані значно простіше і більш надійне порівняно з флюгерним регулюванням. Але необхідно зауважити, що на певних режимах роботи при антифлюгерному регулюванні в системі можуть виникати коливальні процеси. Це обумовлено тим, що діапазон кутів регулювання невеликий (зазвичай від $0^\circ \dots 3^\circ$ до $-10^\circ \dots -12^\circ$), і лопаті з відцентровими тягарцями при різкому збільшенні швидкості вітру за інерцією проходять зону регулювання і входять у зону вентиляторного режиму. Відповідно пружина регулювання повертає лопаті назад, і процес повторюється до його стабілізації. Для уникнення подібних процесів необхідне введення в систему регулювання пристроїв демпфування.

В Інституті відновлюваної енергетики НАН України були проведені теоретичні дослідження та запропоновано вираз для визначення величини моменту демпфування пристрою для системи регулювання ротора вітроустановки відцентровим регулятором з урахуванням параметрів ротора та регулятора [1]. Надалі була запропоновано конструкцію регулятора [2] рис. 1 та методику його розрахунку [3].

Відцентровий регулятор (рис. 1) містить втулку 1, що може переміщуватися на валу 2 ротора вітроустановки завдяки тому, що вона через важільно-шарнірний механізм 13 з'єднана з поворотними лопатями, на махах яких закріплені відцентрові тягарці 6. При цьому вона здійснює зворотно-поступальний рух уздовж валу 2, оскільки палець 3, який закріплений у ній, переміщується у пазах валу 2. Втулка 1 через пускову пружину 8 також взаємодіє з повзуном 7, який, у свою чергу, взаємодіє з пружиною регулювання 9. Пристрій демпфування через тягу 4 з'єднаний з пальцем 3 і, відповідно, з втулкою 1. Пристрій демпфування включає два гнучкі елементи 5, що кріпляться з двох сторін до шайби 10. У тілі шайби 10 встановлені пакет дросельних шайб 11 та зворотний клапан 12.

Працює запропонована конструкція таким чином. При відсутності швидкості вітру кути встановлення лопатей становлять приблизно $20^\circ \dots 30^\circ$, а втулка 1 займає крайнє ліве положення. При збільшенні швидкості вітру зростає кут встановлення ротора, і відцентрові сили від тягарців 6 розвертають лопаті у сторону зменшення кутів встановлення. При цьому завдяки важільно-шарнірному механізму 13 розворот лопатей передається на втулку 1, яка по-

чинає переміщуватися вправо, стискаючи при цьому пускову пружину 8. Цей процес триває доти, доки кути встановлення не досягнуть значення початку регулювання ($0^\circ \dots 3^\circ$). У цей момент втулка 1 вступає в контакт з повзуном 7 і, таким чином, за умови подальшого збільшення кутової швидкості ротора, починає стискатися також і пружина регулювання 9. Під час переміщення втулки 1 вправо у пристрої демпфування зворотний клапан 12 відкривається, і вся робоча рідина практично без перешкод надходить у праву порожнину, що розміщена між правим гнучким елементом 5 та шайбою 10. При розвертанні лопатей у вихідне положення, тобто у сторону збільшення кутів установки, втулка 1 і тяга 4 відповідно рухаються у зворотному напрямку. При цьому зворотний клапан 12 закривається, і вся наявна робоча рідина змушена проходити через пакет дросельних шайб 11. Цей пакет має досить значний гідравлічний опір, а тому рух у зворотному напрямку здійснюється з набагато меншою швидкістю.

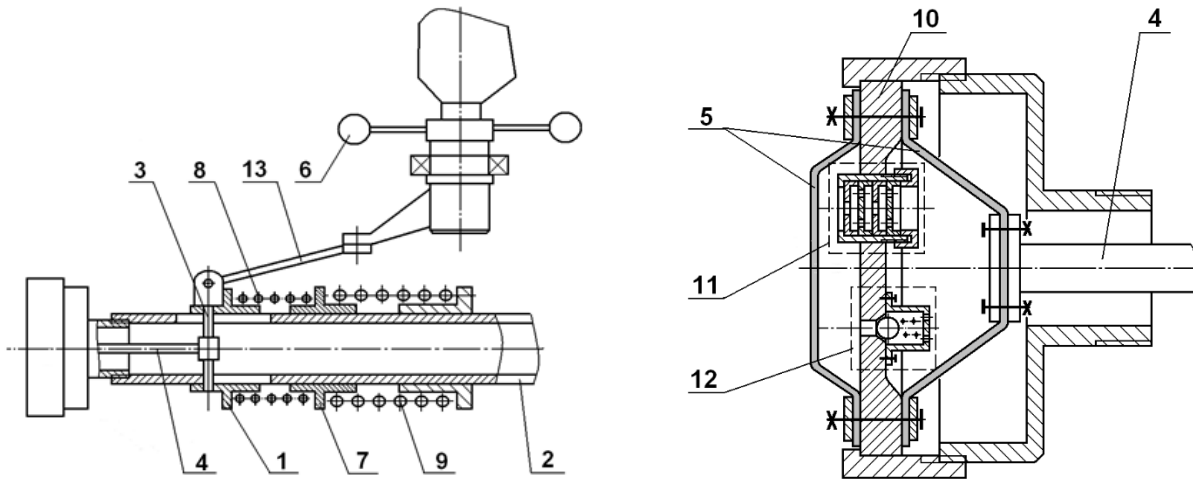


Рис.1. Схема відцентрового регулятора та пристрою демпфування ротора вітроустановки

Таким чином за рахунок використання гідравлічного пристрою демпфування буде забезпечуватись стабілізація положення лопаті в діапазоні кутів регулювання та збільшується ресурс роботи вітроустановки. Крім цього необхідно зауважити, що в пристрої демпфування відсутні ущільнюючі кільця, що також сприяє збільшенню строку служби установки.

ПОСИЛАННЯ

1. Головка В.М., Коханевич В.П., Шихайлов М.О. Коригування динамічних процесів у системі регулювання ротора вітроустановки з відцентровим регулятором. Відроджування енергетика, №4(71), 2022, с 49-55, [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4\(71\).49-55](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.4(71).49-55).
2. Коханевича В.П., Шихайлова М.О., Шкап С.С., Пережух І.П. Регулятор частоти обертання ротора вітрогенератора. Патент України на корисну модель №54700, опублік. 25.11.2010, бюл. №22.
3. Коханевича В.П., Шихайлов М.О. Розрахунок параметрів пристрою демпфування системи відцентрового регулювання ротора вітрогенератора. Матеріали Х Міжнародної конференції «Відроджування енергетика ХХІ століття», АР Крим, смт. Миколаївка, 13-18 вересня 2009 р.

УДК 621.313:621.365.5

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ В СИСТЕМІ «ВІТРОУСТАНОВКА – ПОСТІЙНІ МАГНІТИ»

В. М. Головка¹, В. І. Міхалін²

¹ Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вулиця Метрологічна 48, м. Київ, Україна, 03143

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Берестейський проспект, 37, м. Київ, Україна, 03056,
e-mail: e-mail: golovkovm@ukr.net

Дослідження прямого індукційного нагрівання у багатополісній системі з постійними магнітами поєднує аналітичне моделювання та натурний експеримент. Теоретичну теплову потужність розраховано методом еквівалентних контурів і рівнянь взаємодуктивності, а суто електромагнітну складову тепла виокремлено за допомогою розробленої методики розділення втрат на основі балансу проти-ЕРС.

Ключові слова: вихрові струми, струми фуко, постійні магніти, індукційне нагрівання, теплогенерація, вітроенергетична установка.

MATHEMATICAL MODEL AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE INDUCTION HEATING PROCESS IN A "WIND TURBINE – PERMANENT MAGNETS" SYSTEM

Holovko V.¹, Mikhalin V.²

¹Institute of renewable energy, NAS of Ukraine, Kyiv, Ukraine, Metrolohična st. 48, Kyiv, Ukraine, 03143

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteisky ave. 37, Kyiv, Ukraine, 03056
e-mail: golovkovm@ukr.net

The study of direct induction heating in a multipole permanent magnet system combines analytical modeling and physical experiment. Theoretical thermal power was calculated using the equivalent circuit method and mutual inductance equations, while the pure electromagnetic heat component was isolated using a developed loss separation technique based on back-EMF balance.

Keywords: eddy currents, Foucault currents, permanent magnets, induction heating, heat generation, wind turbine.

ORCID: ¹0000-0003-0195-9654, ²0000-0002-4216-5706.

Стрімке зростання світового попиту на енергоресурси та глобальна стратегія декарбонізації економіки вимагають інтенсифікації розвитку технологій відновлюваної енергетики. Значна частка енергоспоживання, особливо у приватному секторі та сільському господарстві, припадає не на електропостачання, а на потреби теплозабезпечення. Використання для цих задач традиційного ланцюга перетворення енергії вітру в тепло (вітротурбіна – електрогенератор – перетворювач – електричний нагрівач) є технічно та економічно нераціональним через надлишкову складність, необхідність узгодження характеристик та кумулятивні втрати енергії на численних етапах перетворення [1]. Альтернативою є електромагнітні системи прямої генерації теплової енергії, де механічна енергія ротора перетворюється у теплову за допомогою вихрових струмів без проміжного етапу генерації струму промислової частоти. Проте широке впровадження таких пристроїв стримується складністю їх проектування: чисельне 3D-моделювання вимагає значних обчислювальних потужностей, а існуючі аналітичні методи базуються на надмірно спрощених моделях. Робота присвячена розробці та експериментальній верифікації уточненої методики аналітичного розрахунку потужності такого теплогенератора.

Для аналітичного розрахунку потужності здійснено перехід від фізичної моделі установки до еквівалентної заступної схеми з двома індуктивно зв'язаними контурами. Постійний магніт з аксіальною намагніченістю розглядається як еквівалентна котушка з одним витком, струм у якій обчислюється з умови рівності енергій магнітного поля реального магніту та котушки індуктивності. Локальна область статора, що знаходиться безпосередньо під магнітом, моделюється як короткозамкнений круговий виток з активним та індуктивним опором. Циліндричну

форму магніта було обрано для уникнення похибок спотворення траєкторій вихрових струмів на кутах контуру, що дозволяє застосувати точну аналітичну модель обчислення активного опору протіканню вихрових струмів [2]. Власні та взаємна індуктивності еквівалентної котушки та статора розраховані з використанням класичних рівнянь електромагнітного поля, які комплексно враховують геометричні розміри та крайові ефекти [3]. Фінальна теплова потужність індукційного нагрівання обчислюється за законом Джоуля-Ленца.

Для верифікації моделі було спроектовано експериментальну установку, приводом якої слугує колекторний двигун постійного струму серії RS-775. Роторна збірка містить 10 неодимових магнітів циліндричної форми марки N38, встановлених із чергуванням полярності (5 пар полюсів). Досліджувалися статори з матеріалів із різними електрофізичними властивостями: міді M2, алюмінієвого сплаву АД0 та аустенітної сталі 08X18H10 при фіксованому значенні ширини повітряного проміжку між ними 2 мм.

Критичним етапом дослідження стало точне виокремлення суто електромагнітних втрат від електричних, механічних та аеродинамічних втрат експериментальної установки. Для цього застосовано удосконалену методику розділення втрат. Вона поєднує метод вирівнювання обертів холостого ходу та аналітичний розрахунок еквівалентного динамічного опору системи через баланс протиелектроорушійної сили двигуна. Такий підхід дозволив виокремити теплову потужність, витрачену на індукційне нагрівання з повної електричної потужності, спожитої експериментальною установкою.

Експериментальні криві нагрівання для всіх статорів мають класичний експоненціальний характер. Підтверджено пряму кореляцію інтенсивності теплогенерації з питомою електропровідністю матеріалу: високопровідні мідь та алюміній генерують на порядок більше тепла порівняно з низькопровідною нержавіючою сталлю.

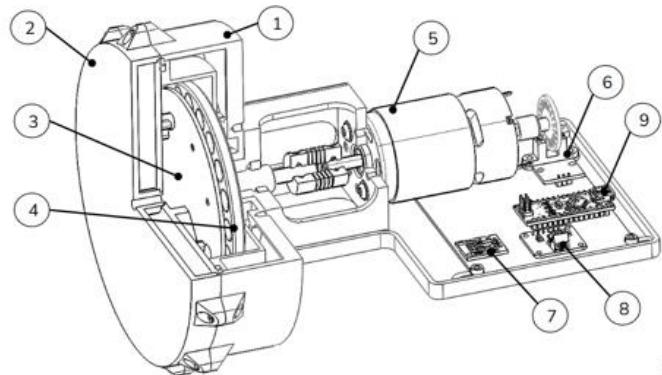


Рис. 1. Загальний вигляд та 3D-модель експериментального стенда: 1 – теплоізоляційний кожух; 2 – кришка; 3 – металевий статор; 4 – ротор із постійними магнітами; 5 – колекторний двигун; 6 – оптичний датчик швидкості; 7 – зовнішній датчик температури; 8 – модуль вимірювання напруги та струму; 9 – мікроконтролер (Arduino Nano).

Величина виявлених розбіжностей між експериментальними та розрахунковими значеннями підтверджує, що запропонована математична модель на основі еквівалентних контурів є ефективним інструментом лише для ескізного інженерного розрахунку величини теплової потужності. Для точної оцінки та оптимізації багатополосних індукційних систем найбільш достовірним інструментом залишається розроблений калориметричний експериментальний метод на основі балансу проти-ЕРС. Він є набагато точнішим, оскільки враховує всю сукупність електромагнітних полів розсіювання та теплових нелінійностей, що виникають у системі «вітроустановка – постійні магніти».

ПОСИЛАННЯ

1. Global Wind Energy Council. (2023). Global Wind Report 2023. Brussels: GWEC.
2. Siakavellas, N. J. (1997). Two simple models for analytical calculation of eddy currents in thin conducting plates. IEEE Transactions on Magnetics, 33(3), 2245–2257.
3. Калантаров П. Л., Цейтлин Л. А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. – 3-е изд., перераб. и доп. Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. Отд-ние, 1986. – 488 с.: ил.

КОРЕЛЯЦІЯ ПИТОМОЇ ПОТУЖНОСТІ ВІТРОВОГО ПОТОКУ ДЛЯ ВІДДАЛЕНИХ ОДНА ВІД ОДНОЇ ВІТРОВИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СТАНЦІЙ

О. Г. Молибог

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (095) 505-90-04, e-mail: almolibog@gmail.com

Із зміною моделі енергетичної системи України та її переходу від централізованої моделі до децентралізованої та задля реалізації потенціалу в 134 ГВт вітрової та сонячної генерації до 2050 року [1] змінюються технічні вимоги до нової системи та її елементів. Разом із тим перегляду потребують і підходи, що використовуються при оцінюванні впливу на баланс системи об'єктів генерації, які використовують відновлювані джерела із негарантованим графіком відпуску.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, вітрові електричні станції, локальні електричні мережі, питома швидкість вітру.

CORRELATION OF POWER DENSITY FOR SPATIALLY SEPARATED WIND POWER PLANTS

O. Molyboh

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

As Ukraine's energy system transitions from a centralized to a decentralized model, and in pursuit of realizing the country's potential of 134 GW of wind and solar generation capacity by 2050 [1], the approaches to assessing the impact of renewable energy generation facilities on system balance must also evolve accordingly.

Keywords: renewable energy sources, wind energy, wind power plants, local electrical grids, power density.

Одним із важливих етапів розвитку проєктів вітрової електричної станції є визначення оптимальної розстановки вітрових турбін для зменшення взаємного негативного впливу та збільшення кореляції продуктивності окремих ВЕУ одного вітрового парку. Водночас із збільшенням кількості об'єктів генерації, зокрема ВЕС, на окремій території зростає і насиченість виробників в окремому енерговузлі та їх взаємний вплив. Визначення перетоків між генерацією, енергосистемою та споживачами є предметом окремих розрахунків для визначення достатності пропускної спроможності мережі в нормальних, ремонтних та аварійно-ремонтних режимах, що обов'язково виконуються при приєднанні нової електростанції до загальної мережі. Відповідно до п. 14.5 СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014 «Норми технологічного проєктування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище» в таких розрахунках «...потужність ВЕС та СЕС приймають за їх максимальною робочою потужністю...» [2], а відтак, не враховуються фізичні особливості джерел негарантованої потужності. Такий підхід, попри коригування з боку ОСП [3], призводить до завищення обсягів реконструкцій мереж ОСП або ОСР та завищення потреб в балансує-чих потужностях.

Більша частка робіт сфокусована на просторовій кореляції виробництва електричної енергії вітровими станціями, що розташовані на істотній відстані в 100 – 700 км. [4], 10 – 1274 км. [5], ~1000 км [5]. Проте критично важливим з огляду на вимоги нормативних документів є визначення взаємного впливу в межах одного енерговузла, тобто, навколо однієї чи декількох близько розташованих підстанцій. В дослідженні виконано оцінку взаємного впливу шести віртуальних вітрових електричних станцій, що розташовані в центральній Україні (в адміністративних межах Вінницької області) - регіоні, що найближчим часом має стати новою точкою тяжіння вітрової енергетики країни. При виконанні роботи, за даними реаналізу п'ятихвилинних інтервалів швидкості вітру на висоті 120 м, що були отримані з Wind Resources Data Base [7], розраховано питому потужність вітрового потоку та сформовано часові ряди для усіх чотирьох сезонів року. Для кожної пари ВЕС було визначено відстань (див. рисунок 1) та за числовими рядами швидкості вітру та питомої потужності ВЕС розраховано коефіцієнти кореляції Спірмана та Пірсона. В таблиці 1 наведено результати розрахунків кореляції, які показують сильну кореляцію для обох метрик та для обох досліджуваних величин.

Таблиця 1 – Коефіцієнти кореляції, що розраховано для пар досліджуваних віртуальних ВЕС для 5-ти хвилинних інтервалів на висоті 120 м

Коефіцієнти кореляції для швидкості вітру						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
B1	—	0.8608	0.87	0.7606	0.6996	0.6943
B2	0.8565	—	0.8009	0.8716	0.7453	0.7949
B3	0.8578	0.7916	—	0.769	0.7936	0.7455
B4	0.7456	0.8637	0.7593	—	0.8237	0.8704
B5	0.676	0.7292	0.7808	0.8165	—	0.8493
B6	0.674	0.7871	0.7323	0.8668	0.8404	—
Коефіцієнти кореляції для питомої потужності вітрового потоку.						
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
B1	—	0.865	0.8752	0.7875	0.739	0.7445
B2	0.8565	—	0.8183	0.8711	0.7682	0.8099
B3	0.8578	0.7916	—	0.7927	0.8186	0.7955
B4	0.7456	0.8637	0.7593	—	0.8291	0.8616
B5	0.676	0.7292	0.7808	0.8165	—	0.8491
B6	0.674	0.7871	0.7323	0.8668	0.8404	—

Примітка: Коефіцієнт Пірсона показано вище головної діагоналі; коефіцієнт Спірмена – нижче головної діагоналі.

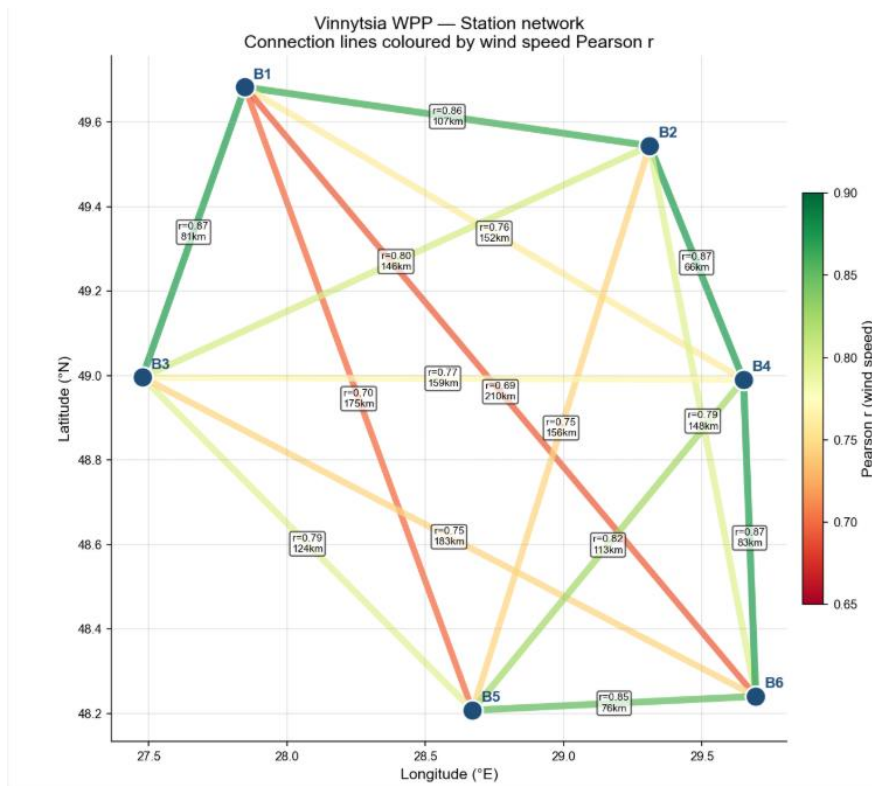


Рисунок 1 – Ситуаційний план досліджуваного району розташування віртуальних ВЕС.

Проте, маючи схожий тренд, умовні миттєві значення середньої швидкості вітру та потужність ВЕС (як їх похідна) можуть мати неоднакові значення для віддалених ВЕС через локальні особливості орографії. Водночас при деталізації сітки даних ERA-5 та зменшенні її як у просторовому вимірі (зменшення кроку до 2 км), так і у часовому (до 5 хв) у даних NREL враховано фактори, що прискорюють або уповільнюють швидкість вітру. Отже, для визначення впливу місцевих умов, для кожної пари ВЕС було виконано перевірку кількості збігів швидкості вітру та питомої щільності вітрового потоку для визначених інтервалів і виконано їх кількісну оцінку. Для прикладу, в таблиці 2 показано відносну кількість збігів значень питомої щільності вітрового потоку відносно ВЕС В-1, що є характерним для будь-якої пари ВЕС.

Таблиця 2 – Відносна кількість збігів вимірювань питомої щільності вітрового потоку відносно ВЕС В1.

Інтервали		Кількість збігів відносно В1				
Швидкість вітру, м/с	Питома щільність вітру Вт/м²	В2	В3	В4	В5	В6
0,00–2,99	0,00–16,37	51,2%	66,0%	38,4%	46,7%	36,9%
3,00–3,49	16,54–26,04	11,4%	15,8%	6,9%	9,8%	7,2%
3,50–4,49	26,26–55,44	21,9%	28,3%	16,7%	16,5%	16,0%
4,50–5,49	55,81–101,35	23,8%	27,1%	19,1%	19,5%	16,2%
5,50–6,49	101,90–167,43	23,5%	25,4%	18,1%	16,5%	15,3%
6,50–7,49	168,21–257,37	23,6%	23,9%	20,6%	18,5%	16,8%
7,50–8,49	258,40–374,83	27,2%	22,9%	20,0%	17,5%	17,5%
8,50–9,49	376,15–523,49	29,4%	23,6%	18,0%	15,1%	17,1%
9,50–10,49	525,14–707,02	25,8%	20,3%	18,4%	11,9%	15,9%
10,50–11,49	709,05–929,11	29,0%	20,4%	16,7%	12,2%	13,6%
11,50–12,49	931,54–1193,42	27,3%	15,8%	15,9%	8,3%	9,8%
12,50–13,49	1 196,29–1 503,63	19,6%	14,4%	11,1%	7,8%	10,5%
13,50–14,49	1 506,98–1 863,42	22,4%	16,9%	12,6%	7,1%	9,9%
14,50–15,49	1 867,28–2 276,46	18,1%	12,6%	7,2%	5,2%	6,4%
15,50–16,49	2 280,87–2 746,43	17,4%	12,0%	4,6%	3,4%	4,4%
16,50–17,49	2 751,43–3 276,99	18,3%	18,9%	12,1%	5,9%	8,7%
17,50–18,49	3 282,62–3 871,83	18,9%	16,2%	4,5%	0,0%	2,7%
18,50–19,49	3 878,12–4 534,63	18,5%	14,8%	0,0%	0,0%	0,0%
19,50–20,49	4 541,61–5 269,05	9,5%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
>20,50	>5 276,76	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Отримані результати загалом підтверджують показану в роботах [4,5,6] зворотну залежність кореляції потужності декількох ВЕС залежно від відстані між ними – чим більша відстань, тим менша кореляція між ними. Водночас розрахунки показують істотний вплив на збіг потужностей для коротших інтервалів локальних умов. Вірна оцінка таких умов при виконанні техніко-економічного обґрунтування проєктів вітрових станцій та їх схем видачі потужності дозволить зменшити вимоги до реконструкцій електричних мереж, потреби в балансуючих потужностях, а також економічно обґрунтовані потужності та ємність установок зберігання енергії.

ПОСИЛАННЯ

1. Стратегія майбутнього: Україна – це енергетичний хаб, який допоможе Європі позбутися від росії/ Урядовий портал [Електронний ресурс] URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/stratehiia-maibutnoho-ukraina-tse-enerhetychnyi-khab-ia-kyi-dopomozhe-ievropi-pozbutysia-zalezhnosti-vid-rosii> (дата звернення 20.03.2026)
2. СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227-101:2014 Норми технологічного проектування енергетичних систем і електричних мереж 35 кВ і вище/ Науково-проектний центр розвитку Об'єднаної енергетичної системи України НЕК «Укренерго» (НПЦР ОЕС України) – Київ: 2014.- 60 ст.
3. Доповнення вимог нормативних документів/НЕК Укренерго [Електронний ресурс] URL: <https://ua.energy/pryyednyannya/dopovnennya-vymog-normatyvno-tehnichnyh-dokumentiv/> (дата звернення 20.03.2026)
4. М. П. Кузнецов, О. О. Кармазін. Вплив просторової дисперсії на сумарну потужність групи ВЕС. Відроджувана енергетика. 2013. № 3 с. 62-67.
5. Clara M St. Martin Julie K Lundquist and Mark A Handschy. Variability of interconnected wind plants: correlation length and its dependence on variability time scale. Environmental Research Letters No10. 2015. doi:10.1088/1748-9326/10/4/044004.
6. T. Enomoto T. Ikegami C. T. Urabe T. Saitou K. Ogimotob. Geographical smoothing effects on wind power output variation in Japan. International Journal of Smart Grid and Clean Energy. 2018. doi: 10.12720/sgce.7.3.188-194.
7. WRDB: Wind resources data base URL: <https://wrdb.nrel.gov/> (дата звернення: 22.02.2026).

ВИКОРИСТАННЯ ВІДЦЕНТРОВИХ СИЛ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ КУТОВОЇ ШВИДКОСТІ РОТОРІВ ВІТРОЕЛЕКТРИЧНИХ УСТАНОВОК**М. О. Шихайлов¹, В. П. Коханевич²,***Інститут відновлюваної енергетики НАН України**03143, м. Київ, вул. Метрологічна, 50**тел./факс 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua*

Вітроелектричні установки (ВЕУ) малої потужності перш за все характеризуються високим значенням кутової швидкості ротора. Це означає, що на всі елементи ротора, включаючи самі лопаті, під час обертання діють значні відцентрові сили. Тому для обмеження кутової швидкості ротора в них широко застосовуються відцентрові регулятори прямої дії різних конструкцій.

Найбільш поширеною є конструкція, де відцентрові сили діють безпосередньо на закріплені на махах лопатей відцентрові тягарці. Назвемо її умовно класичною. Виникаючи при обертанні ротора відцентрові сили повертають лопаті навколо власної вісі обертання або в бік зменшення кута атаки (флюгерне регулювання) або в бік його збільшення (анти флюгерне регулювання) [1]. На 79-80 сторінках цієї праці описана конструкція і принцип дії відцентрового регулятора вітроустановки ВБЛ-3. Це класичний випадок анти флюгерного регулювання, його ще називають зривним. Вітроустановка ВБЛ-3, що обладнана поворотними лопатями з відцентровим регулятором кутової швидкості ротора, який складається з жорстко встановлених на махах лопатей відцентрових тягарців, кривошипно-шатунового механізму, що передає рух від поворотних лопатей до втулки, яка може здійснювати зворотно-поступальний рух вздовж головного валу. При цьому русі втулка має можливість стискувати спочатку пускову пружину (меншої жорсткості), потім більш жорстку робочу пружину. Таким чином, баланс сил, що діють на лопаті, порушується і лопаті, якщо їх не утримувати в такому положенні, різко виводяться пружинами на вихідні кути установки. Ротор знову починає прискорюватися.

Зупинка вітроустановки здійснюється вручну з землі завдяки ручному приводу зупинки ротора. При запуску вітроустановки кут встановлення має значення близько 30° , що збільшує початковий обертальний момент та забезпечує самозапуск при появі достатньої швидкості вітру. В робочому положенні кут встановлення має значення близько 7° , а в зупиненому - мінус 2° . В процесі регулювання кут змінюється у вказаному діапазоні (від плюс 7 до мінус двох градусів). Тобто маємо класичний приклад так званого антифлюгерного або зривного регулювання.

Недоліком вказаного пристрою є складність конструкції: дві пружини, кривошипно-шатуновий механізм, рухома втулка, самі тягарці, державка, на якій вони кріпляться, підшипникові вузли у махах лопатей або у маточині, ручний привід зупинки ротора і т.д.

Крім того, така вітроустановка має недолік, що притаманний всім вітроустановкам з антифлюгерним регулюванням - це необхідність утримувати кут встановлення лопатей у незмінному значенні поблизу так званих критичних кутів атаки, де відбувається зрив потоку. При перевищенні цього кута коефіцієнт підйомної сили скачком зменшує своє значення, а сила стиснутої пружини має майже максимальне значення. Таким чином рівновага сил, що діють на лопаті, порушується і лопаті, якщо їх не утримувати у цьому положенні, скачком виводяться за допомогою пружин на пускові кути встановлення. Ротор знову починає розганятися. Тобто має місце пульсуючий режим роботи ротора і всіх механізмів, що з ним пов'язані. А все з-за відсутності пристрою, що міг би утримувати лопаті в зоні критичних кутів атаки на біль менш постійному рівні, навіть при змінюванні кутової швидкості ротора. Подібна конструкція регулятора використана у вітроелектричній станції АВЕУ-4-6 [2] виробництва Астраханського заводу «Ветроэнергомаш» (розробка НПО «Ветроэн», м.Істра, Московської області).

Існують і інші конструкції відцентрових регуляторів. Наприклад, регулятор кутової швидкості по [3]. Тут регулятор обертів ротора вітроустановки містить підпружинену втулку, що виконана з можливістю переміщуватись вздовж головного валу ротора, лучковий механізм, що може повертати лопаті навколо власної вісі обертання за рахунок шківів, які жорстко закріплені на махах лопатей та скоби, що жорстко кріпляться до підпружиненої втулки та охоплюють шків і орієнтовані вздовж валу, при цьому кожен шків охоплений тросом, один кінець якого закріплений на скобі, а інший - на підпружиненій втулці.

Крім того, муфта посаджена на вал ротора з можливістю здійснення зворотно-поступального руху, в ній виконані діаметрально розташовані отвори, а у валу - повздовжні осеві пази, у отворах втулки і пазах встановлений з'єднувальний палець, при цьому вал виконано порожнистим і у порожнині жорстко закріплені направляючі ролики та рухома роликова обойма, яка включає два ролики, що охоплені тросами, кінці одного з яких жорстко з'єднані

відповідно з пальцем і валом, а кінці другого через направляючі ролики – з відцентровими тягарцями. Така конструкція детально розглянута в роботі [4].

Але таке технічне рішення не може вважатися універсальним, тому що виникають певні конструктивні труднощі при її застосуванні, наприклад для найбільш поширеної трилопатевої ВЕУ. Крім того, оскільки відцентрові тягарці повертають лопаті за допомогою лучкового механізму і поліспасти, їхня маса має бути суттєвою.

Якщо існують обмеження щодо осьових габаритів регулятора, а відповідно і маточини, то замість спіральних пружин використовуються пласкі, наприклад як у роботі [5].

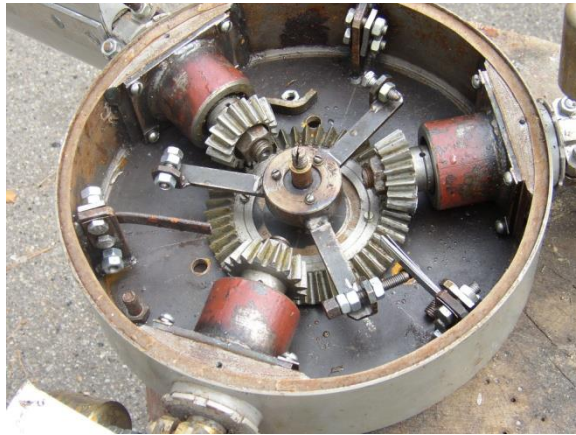


Рис. 1 Загальний вигляд маточини з регулятором на пласких пружинах

Нажалі такі регулятори мають невеликий діапазон кутів регулювання, що обмежує їх сферу застосування тільки для анти флюгерного регулювання.

Відомі конструкції так званих аеропружних лопатів [6], у яких розподіл мас на кінці лопаті виконаний таким чином, що при досягненні ротором номінальної швидкості обертання лопаті під дією відцентрових сил починають скручуватись, що змінює аеродинамічні характеристики лопатів і ротора в цілому. Це теж саме, що закріпити на кінці лопаті відцентровий тягарець, а функцію пружини виконує сама лопать завдяки її власній пружності.

При всій привабливості такої конструкції вона має бути виконана з використанням певних технологій, щоб забезпечити високу точність при виконанні профілю лопаті з одночасним виконанням вимог по розподілу мас на кінці лопаті.

На початку 20-х років 20-го сторіччя проф. Г.Х. Сабінін запропонував систему регулювання, при якій поворот лопаті навколо власної вісі здійснюється під дією сили вітру на спеціальний поворотний відкрилок, який закріплювався на кронштейнах біля задньої кромки лопаті. Цей відкрилок назвали стабілізатором, а регулювання- стабілізаторним [7]. Стабілізатор може обертатись навколо власної вісі обертання під дією відцентрових сил, що діють на спеціальні відцентрові тягарці. На початку 90-х років 20-го століття цю ідею було вдосконалено і реалізовано у вітроустановки ВЕУ-075; ВЕУ-08; ВЕУ-1,6; ВЕУ-4- виробництва та розробки Харківського ПП «Світ вітру» [8].

Цікавий приклад використання відцентрових сил для стабілізації кутової швидкості ротора ВЕУ наведений у роботі [9].

Перш за все ця ВЕУ однолопатева з противагою. Принцип дії ротора полягає у зміні величини конусності ротора під дією сили лобового тиску на лопаті, що призводить до зміни кута встановлення лопаті, за рахунок використання так званого «косого шарніру». В процесі розгону ротора кут конусності під дією відцентрових сил зменшується з одночасним зменшення кута установки лопаті до його робочих значень. Скидання надмірної потужності здійснюється за рахунок гальмування ротора силами Коріоліса, що виникають при русі повітря в порожнині лопаті ротора. Такий рух виникає, коли ротор досягає номінального значення і відчиняється пневматичний клапан під дією відцентрових сил. Така установка була виготовлена у м. Пермь (Росія) та випробувана у одній з аеродинамічних труб ЦАГІ (м. Москва).

Така конструкція ВЕУ не отримала широкого розповсюдження. Причин багато, але основна у неможливості балансування ротора. Здавалося все просто. Лопать врівноважується противагою, але це статичне балансування. При обертанні ротора картина дещо інша. Відомо, що швидкість вітру залежить від висоти над поверхнею землі. На поверхні землі вона практично дорівнює нулю, а з висотою набуває певного значення. Отже коли лопать займає вертикальне положення її кінець може бути або у найнижчому або у найвищому положенні. Вочевидь, що швидкості вітру у цих крайніх положеннях різні, отже і значення аеродинамічних сил теж різні. В той же час противага має відносно невеликі геометричні розміри і тому аеродинамічна сила, яка на неї діє має більш менш

стале значення. Отже при обертанні ротора маємо постійну зміну аеродинамічної сили, що діє на ротор. Цей факт призводить до виникнення коливань, протидіяти яким нема можливості.

Виходячи з аналізу розглянутих конструкцій, які використовують для регулювання відцентрові сили, приходимо до висновку, що відцентрові регулятори прямої дії (ми їх у цій роботі назвали класичними) у найбільшій мірі відповідають пакету вимог до регуляторів ВЕУ малої потужності.

Розглянемо розрахункову схему найпростішого регулятора і проаналізуємо, в яких напрямках рухатись для їх вдосконалення (див. рис.2).

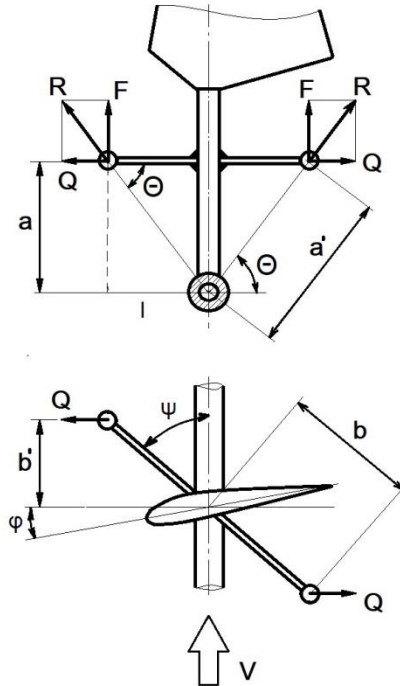


Рис. 2 Розрахункова схема відцентрового регулятора прямої дії

Зазначимо, що для спрощення сприйняття, на рис. 2 не показані всі елементи регулятора, як то пружини, повзун, елементи кріплення, тощо. Отже з розрахункової схеми видно, що момент, який створюється під час обертання ротора від наявних у конструкції відцентрових тягарців, і намагається повернути лопать дорівнює:

$$M = Q \cdot b', \quad (1)$$

де Q -тангенційна складова результуючої відцентрові сили R , b' - плече, на якому сила Q створює момент M . З рис.2 видно, що $b' = b \cdot \cos \psi$, а $Q = R \cdot \cos \theta$, де $\cos \theta = \frac{1}{a'} = \frac{b \cdot \sin \psi}{a'}$. Крім того $R = m \omega^2 a'$. Підставляючи отримані вирази у рівняння (1) після певних перетворень отримаємо:

$$M = 1/2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot b^2 \cdot \sin 2\psi \quad (2)$$

Слід зауважити, що вираз (2) справедливий для одного відцентрового тягарця. Для двох тягарців результат по виразу (2) слід помножити на 2.

Аналізуючи отриманий вираз, перше, що впадає у вічі, це те, що максимального значення вираз (2) набуває при $\psi = 45^\circ$, коли $\sin 90^\circ = 1$.

Друге, на що слід звернути увагу, це те, що момент по виразу (2) ніяким чином не залежить від місця кріплення відцентрових тягарців, тобто від параметру a (див.рис.2). Тому виникає можливість розташовувати їх на будь-якій відстані від вісі обертання ротора, хоч поблизу маточини, а хоч на самому кінці лопаті. Цей факт у свою чергу може значно розширити креативні можливості конструкторів ВЕУ.

Проаналізуємо в яких діапазонах може змінюватись кут ψ між кронштейнами для кріплення відцентрових тягарців і віссю обертання ротора при флюгерному та анти флюгерному регулюванні. При флюгерному регулюванні кут встановлення лопатів ψ змінюється у діапазоні від $+2^\circ$ до $+70^\circ$. Тобто діапазон становить близько 65° . При анти флюгерному цей діапазон, а саме від -5° до $+25^\circ$, майже у 2 рази менший і становить 30° .

Оскільки кути ψ і ϕ змінюються синхронно, то виходячи з виразу (2) $\sin 2\psi$ при флюгерному регулюванні, а значить і момент M , змінюються від 0 при $\psi=0$ до свого максимуму при $\sin 2\psi = 1$ ($\psi=45^\circ$), а потім знову зменшуються до значення приблизно 0,86 від максимального.

Вище, коли мова йшла про аеропружні лопаті, було відмічено, що розподіл мас на кінці лопаті виконаний таким чином, що при досягненні ротором номінальної швидкості обертання, лопаті під дією відцентрових сил починають скручуватись, і що це теж саме, що закріпити на кінці лопаті відцентровий тягарець, а функцію пружини буде виконує сама лопать завдяки її власній пружності.

А такі конструкції теж мають місце [10] та [11]. Якщо в конструкції [10] на кінцях лопатів просто розташовані відцентрові тягарці, обертальний момент від яких врівноважується пружною силою торсіонного валу, що проходить вздовж всієї лопаті у її порожнині і жорстко кріпиться до маточини, то в конструкції [11] ці тягарці виконані у вигляді поршня з діючою на нього робочою рідиною під тиском, який створюється додатковими тягарцями. Таким чином під час руху поршня одночасно змінюються як маса центру тяжіння поршня разом з робочою рідиною, так параметр b виразу (2). А відстань b входить до виразу (2) у квадраті. Отже незначна зміна b призводить до відчутної зміни моменту, що намагається повернути лопать навколо власної вісі обертання.

Висновки.

У малій вітроенергетиці відцентрові регулятори кутової швидкості ротора прямої дії використовуються дуже давно і досить часто завдяки своїй простоті і надійності.

Для отримання максимального значення моменту, що створюється відцентровими тягарцями у регуляторах прямої дії і намагається повернути лопать, направляючи, на яких вони розташовані, мають бути встановлені під кутом близьким до 45° до площини обертання ротора.

Створюваний відцентровими тягарцями момент ніяким чином не залежить від відстані до вісі обертання. Тому виникає можливість розташовувати їх на будь-якій відстані від цієї вісі: хоч поблизу маточини, а хоч на самому кінці лопаті

Уважно аналізуйте вирази, що отримані під час ваших досліджень, адже в них можуть бути зосереджені цілі напрямки подальшої практичної діяльності.

ПОСИЛАННЯ:

1. Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. - 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергоатомиздат, 1983.-200 с., - 200с.
2. Харитонов В.П. Автономные ветроэлектрические установки-М.: ГНУ ВИЭСХ, 2006.-280с
3. А.С.СССР №1038541 Регулятор частоты вращения ветроколеса, заявка 34132132/25-06 від 23.03.82, авторів Н.А.Шихайлова, Ю.В. Шевченка, В.И. Коваленка, опубл.30.08.83. Бюл.№32.
4. Шихайлов М.О., Головка В.М., Коханевич В.П. Використання рівнянь Лагранжа другого роду для отримання статичної характеристики відцентрового регулятора.// Відновлювана енергетика, №4(67), 2021 р., с.60-69.
5. Деклараційний патент України № 28175А, автора Шевченка Ю.В. «Вітроколесо з регулятором», заявка №95041875/23/28 від 25.04.95, опубл., 15.03.90, бюл. №10.
6. Основи вітроенергетики: підручник/Г.Півняк, Ф.Шкрабець, Н.Нойбергер, Д.Ципленков; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т.-Д.: НГУ, 2015.-335с.
7. Фатеев Е.М. Ветродвигатели и ветроустановки. -2-е изд., -М.: Сельхозгиз, 1957.-536с.
8. Фаворський Ю.П., Шихайлов М.О. Практичний досвід використання вітроенергетичних систем.//Електрифікація та автоматизація сільського господарства. №2(7), 2004 р., с.107-113.
9. Ветродвигатель: А.с. 1550209. СССР. МКИ F03D 7/02 /Ю.В.Шевченка- № 4434909/06; Заявл. 31.05.88; Опубл. 15.03.90; Бюл. № 10.
10. Патент України на корисну модель №73244 «Вітроустановка», авторів Мхітаряна Н.М., Шихайлова М.О., Коханевича В.П., Головка В.М., Душиної Г.П., опублік. 10.09.2012, бюл. №17.
11. Патент України на винахід №113386 «Вітроустановка», авторів Шихайлова М.О., Коханевича В.П., Головка В.М., Марченко Н.В., опублік. 25.01.2017, бюл. №2.

USE OF CENTRIFUGAL FORCES TO ADJUST THE ANGULAR SPEED OF WIND POWER PLANT ROTORS

M. Shikhaylov, V. Kokhanevich,

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

03143, Kyiv, Metrologicalna St., 50

tel./fax 206-28-09, e-mail: info@ive.org.ua

The paper presents an incomplete analysis of the designs of centrifugal regulators used in low-power wind turbines. 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.*

Small-power wind turbines (WT) are primarily characterized by a high value of the rotor angular velocity. This means that all rotor elements, including the blades themselves, are subjected to significant centrifugal forces during rotation. Therefore, direct-acting centrifugal governors of various designs are widely used in them to limit the rotor angular velocity.

The most common design is where centrifugal forces act directly on centrifugal weights attached to the blades. Let us call it conventionally classical. The centrifugal forces arising during rotor rotation rotate the blades around their own axis of rotation either in the direction of decreasing the angle of attack (weathervane adjustment) or in the direction of increasing it (anti-weathervane adjustment) [1]. On pages 79-80 of this work, the design and principle of operation of the centrifugal regulator of the ББЛ-3 wind turbine are described. This is a classic case of anti-vane regulation, also called disruptive. ББЛ-3 wind turbine equipped with rotary blades with a centrifugal rotor angular velocity regulator, which consists of centrifugal weights rigidly mounted on the blades, a crank mechanism that transmits movement from the rotary blades to a bushing that can perform reciprocating motion along the main shaft. When this angle is exceeded, the lift coefficient abruptly decreases in value, and the force of the compressed spring has almost the maximum value. Thus, the balance of forces acting on the blades is disturbed and the blades, if they are not held in this position, are abruptly brought out by the springs to the starting installation angles. The rotor begins to accelerate again. The wind turbine is stopped manually from the ground using a manual rotor stop drive. When starting the wind turbine, the installation angle is about 30°, which increases the initial torque and ensures self-starting when sufficient wind speed appears. In the operating position, the installation angle is about 7°, and in the stopped position - minus 2°. During the adjustment process, the angle changes within the specified range (from plus 7 to minus two degrees). That is, we have a classic example of the so-called anti-windfall or disruptive adjustment.

The disadvantage of this device is the complexity of the design: two springs, a crank mechanism, a movable bushing, the weights themselves, the holder on which they are mounted, bearing assemblies in the blade swings or in the hub, a manual rotor stop drive, etc.

In addition, such a wind turbine has a disadvantage that is inherent in all wind turbines with anti-windfall control - the need to keep the blade installation angle constant near the so-called critical angles of attack, where flow disruption occurs. When this angle is exceeded, the lift coefficient sharply decreases in value, and the force of the compressed spring has almost the maximum value. Thus, the balance of forces acting on the blades is disturbed and the blades, if they are not held in this position, are abruptly brought out by springs to the starting angles of installation. The rotor begins to accelerate again. That is, a pulsating mode of operation of the rotor and all mechanisms associated with it occurs. And all because of the lack of a device that could hold the blades in the zone of critical angles of attack at a less than constant level, even when changing the angular velocity of the rotor. A similar regulator design is used in the wind turbine АВЭУ-4-6 [2] manufactured by the Astrakhan plant "Vetroenergomash" (developed by NPO "Vetroen", Istra, Moscow region).

There are other designs of centrifugal regulators. For example, the angular velocity regulator according to [3]. Here, the wind turbine rotor speed controller includes a spring-loaded sleeve that is designed to move along the main rotor shaft, a bow mechanism that can rotate the blade around its own axis of rotation due to pulleys, which are rigidly attached to the blade shafts and brackets that are rigidly attached to a spring-loaded sleeve and cover the pulleys and are oriented along the shaft, with each pulley covered by a cable, one end of which is attached to the bracket and the other to the

spring-loaded sleeve. In addition, the coupling is mounted on the rotor shaft with the possibility of reciprocating motion, it has diametrically located holes, and the shaft has longitudinal axial grooves, and a connecting pin is installed in the holes of the sleeve and grooves, in this case, the shaft is made hollow and the guide rollers and the movable roller cage, which includes two rollers covered with cables, the ends of one of which are rigidly connected to the finger and the shaft, respectively, and the ends of the other through the guide rollers - to centrifugal weights, are rigidly fixed in the cavity. This design is considered in detail in [4].

But such a technical solution cannot be considered universal, because there are certain design difficulties in its application, for example, for the most common three-bladed wind turbine. In addition, since the centrifugal weights rotate the blades using a bow mechanism and a pulley block, their mass must be significant.

If there are restrictions on the axial dimensions of the regulator, and accordingly the hub, then instead of spiral springs, flat springs are used, for example, as in [5].



Fig. 1 General view of the hub with a regulator on flat springs

Unfortunately, such regulators have a small range of adjustment angles, which limits their scope of application only to anti-vane regulation.

There are known designs of so-called aeroelastic blades [6], in which the distribution of masses at the tip of the blade is made in such a way that when the rotor reaches the nominal rotation speed, the blades begin to twist under the action of centrifugal forces, which changes the aerodynamic characteristics of the blades and the rotor as a whole. This is the same as attaching a centrifugal weight to the end of a blade, and the blade itself performs the function of a spring due to its own elasticity.

Despite the attractiveness of such a design, it must be made using certain technologies to ensure high accuracy in the execution of the blade profile while simultaneously meeting the requirements for mass distribution at the tip of the blade.

In the early 1920s, Prof. G.H. Sabinin proposed a system of regulation in which the rotation of the blade around its own axis is carried out under the action of the wind force on a special rotary opener, which was fixed on brackets near the trailing edge of the blade. This opener was called a stabilizer, and the regulation was called a stabilizer [7].

The stabilizer can rotate around its own axis of rotation under the action of centrifugal forces acting on special centrifugal weights. In the early 90s of the 20th century, this idea was improved and implemented in wind turbines BEY-075; BEY-08; BEY-1.6; BEY-4 - manufactured and developed by the Kharkiv privat plant "World of Wind" [8].

An interesting example of using centrifugal forces to stabilize the angular velocity of a wind turbine rotor is given in [9].

First of all, this wind turbine is single-bladed with a counterweight. The principle of operation of the rotor is to change the size of the rotor taper under the action of the force of frontal pressure on the blade, which leads to a change in the angle of installation of the blade, due to the use of the so-called "oblique hinge". During the rotor acceleration process, the taper angle under the action of centrifugal forces decreases with a simultaneous decrease in the blade installation angle to its operating values. The discharge of excess power is carried out by braking the rotor by Coriolis forces arising from the movement of air in the cavity of the rotor blade. Such movement occurs when the rotor reaches its nominal value and the pneumatic valve opens under the action of centrifugal forces. Such a device was manufactured in Perm (Russia) and tested in one of the wind tunnels of TsAGI (Moscow).

This design of wind turbines has not gained wide distribution. There are many reasons, but the main one is the impossibility of balancing the rotor. It all seemed simple. The blade is balanced by a counterweight, but this is static balancing. When the rotor rotates, the picture is somewhat different. It is known that wind speed depends on the height

above the earth's surface. On the earth's surface, it is practically zero, and with height it acquires a certain value. So when the blade is in a vertical position, its end can be either in the lowest or in the highest position. Obviously, the wind speeds in these extreme positions are different, and therefore the values of the aerodynamic forces are also different. At the same time, the counterweight has relatively small geometric dimensions and therefore the aerodynamic force acting on it has a more or less constant value.

So, when the rotor rotates, we have a constant change in the aerodynamic force acting on the rotor. This fact leads to the appearance of oscillations that cannot be counteracted.

Based on the analysis of the considered designs that use centrifugal forces for regulation, we come to the conclusion that direct-acting centrifugal regulators (we called them classical in this work) to the greatest extent meet the package of requirements for regulators of low-power wind turbines.

Let us consider the calculation scheme of the simplest regulator and analyze in which directions to move for their improvement (see Fig. 2).

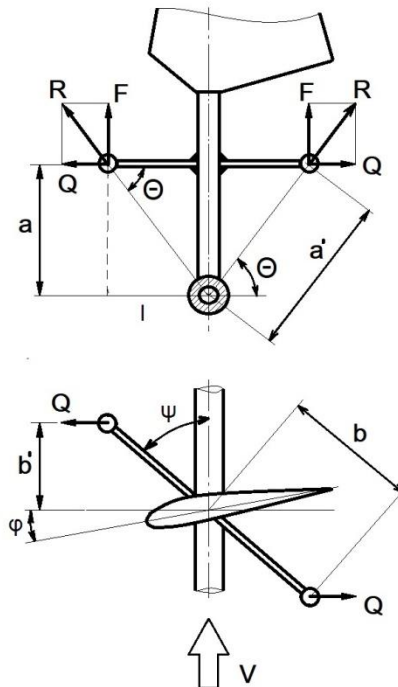


Fig.2 Calculation diagram of a direct-acting centrifugal regulator

Note that to simplify perception, Fig. 2 does not show all the elements of the regulator, such as springs, slider, fastening elements, etc. So, from the calculation diagram it is clear that the moment created during the rotation of the rotor from the centrifugal weights present in the design, and trying to turn the blade, is equal to:

$$M = Q \cdot b', \quad (1)$$

where "Q" is the tangential component of the resultant centrifugal force R, "b'" is the arm on which the force "Q" creates the moment "M". From Fig. 2 it can be seen that " b' = b \cdot \cos \psi", and " Q = R \cdot \cos \Theta", where $\cos \Theta = l/a' = (b \cdot \sin \psi)/a'$. In addition, $R = m \omega^2 a'$. Substituting the obtained expressions into equation (1) after certain transformations, we obtain:

$$M = 1/2 \cdot m \cdot \omega^2 \cdot b^2 \cdot \sin^2 \psi \quad (2)$$

It should be noted that expression (2) is valid for one centrifugal weight. For two weights, the result of expression (2) should be multiplied by 2.

Analyzing the obtained expression, the first thing that catches the eye is that expression (2) reaches its maximum value at $\psi = 45^\circ$, when $\sin 90^\circ = 1$.

The second thing to note is that the moment according to expression (2) does not depend in any way on the location of the centrifugal weights, i.e. on the parameter a (see Fig. 2). Therefore, it becomes possible to place them at any distance from the axis of rotation of the rotor, even near the hub, or even at the very end of the blade. This fact, in turn, can significantly expand the creative possibilities of wind turbine designers.

Let us analyze in what ranges the angle ψ between the brackets for fastening centrifugal weights and the axis of rotation of the rotor can change during weather vane and anti-weather vane adjustment. During weather vane adjustment, the

blade installation angle ϕ varies in the range from $+2^\circ$ to $+70^\circ$. That is, the range is about 65° . During anti-weather vane, this range, namely from -5° to $+25^\circ$, is almost 2 times smaller and is 30° .

Since the angles ψ and ϕ change synchronously, based on expression (2), $\sin^2 2\psi$ during weathervane regulation, and hence the moment M , change from 0 at $\psi=0$ to its maximum at $\sin^2 2\psi=1$ ($\psi=45^\circ$), and then again decreases to a value of approximately 0.86 of the maximum.

Above, when talking about aeroelastic blades, it was noted that the distribution of masses at the tip of the blade is made in such a way that when the rotor reaches its nominal rotation speed, the blades begin to twist under the action of centrifugal forces, and that this is the same as attaching a centrifugal weight to the tip of the blade, and the function of the spring will be performed by the blade itself due to its own elasticity.

And such designs also exist [10] and [11]. If in design [10] at the ends of the blades there are simply centrifugal weights, the torque from which is balanced by the elastic force of the torsion shaft, which runs along the entire blade in its cavity and is rigidly attached to the hub,

And such designs also exist [10] and [11]. If in design [10] at the ends of the blades there are simply centrifugal weights, the torque from which is balanced by the elastic force of the torsion shaft, which runs along the entire blade in its cavity and is rigidly attached to the hub, then in the design [11] these weights are made in the form of a piston with a working fluid acting on it under pressure, which is created by additional weights. Thus, during the movement of the piston, both the mass of the center of gravity of the piston together with the working fluid and the parameter b of expression (2) change simultaneously. And the distance b is included in expression (2) in the square. Therefore, a slight change in b leads to a noticeable change in the moment that tries to rotate the blade around its own axis of rotation.

Conclusions

1. In small wind power, direct-acting centrifugal rotor angular velocity controllers have been used for a very long time and quite often due to their simplicity and reliability.
2. To obtain the maximum value of the moment created by centrifugal weights in direct-acting governors and trying to rotate the blade, the guides on which they are located should be installed at an angle close to 45° to the plane of rotation of the rotor.
3. The moment created by centrifugal weights does not depend in any way on the distance to the axis of rotation. Therefore, it becomes possible to place them at any distance from this axis: even near the hub, or even at the very end of the blade
4. Carefully analyze the expressions obtained during your research, because they can focus on entire areas of further practical activity.

REFERENCES

1. Schefter Y.I. Use of wind energy. - 2nd ed., revised. and additional M.: Energoatomizdat, 1983.-200 p.,-200 p.
2. Kharitonov V.P. Autonomous wind-electric installations-M.: GNU VIESH, 2006.-280 p
3. Author's certificate of the USSR №1038541, bulletin of inventions №32, 1983.
4. Shykhaylov M.O., Golovko V.M., Kokhanevich V.P. Using Lagrange equations of the second kind to obtain static characteristics of a centrifugal regulator.// Renewable Energy, No. 4(67), 2021, pp. 60-69.
5. Declaratory patent of Ukraine No. 28175A, author Shevchenko Y.V. "Wind wheel with regulator", application No. 95041875/23/28 dated 04/25/95, publ., 03/15/90, bulletin No. 10.
6. Fundamentals of wind energy: textbook/G. Pivnyak, F. Shkrabets, N. Neuberger, D. Tsyplenkov; Ministry of Education and Science of Ukraine, National Mining University-D.: NGU, 2015.-335p.
7. Fateev E.M. Wind turbines and wind turbines. - 2nd edition, - Moscow: Selkhozgiz, 1957. - 536 p.
8. . Favorskyi Yu.P., Shykhaylov M.O. Practical experience in using wind energy systems.//Electrification and automation of agriculture. No. 2(7), 2004, pp. 107-113.
9. Author's certificate of the USSR №1550209, bulletin of inventions №10, 1990.
10. Patent of Ukraine for utility model No. 73244 "Wind turbine", authors Mkhitaryan N.M., Shikhaylov M.O., Kokhanevich V.P., Golovka V.M., Dushina G.P., published 10.09.2012, Bulletin No. 17.
11. Patent of Ukraine for invention No. 113386 "Wind turbine", authors Shikhaylov M.O., Kokhanevicha V.P., Golovka V.M., Marchenko N.V., published 01/25/2017, Bulletin No. 2.

ПРОГНОЗУВАННЯ СУЧАСНОГО ВИБОРУ ПАЛИВ ДЛЯ ПРОМИСЛОВОСТІ ТА ЕНЕРГЕТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В УМОВАХ ГІБРИДНОЇ ДЕКАРБОНІЗАЦІЇ

Б. С. Сорока¹, Д. І. Федоров^{2*}, А. В. Луба³

Інститут газу НАН України
вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна
*Тел.: +380997688886, e-mail: fedorov522@gmail.com

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувалися методи предиктивного моделювання на основі алгоритмів штучного інтелекту, системний аналіз макроекономічних баз даних, а також методи термодинамічного і теплофізичного аналізу процесів спалювання гібридних газових сумішей.

Ключові слова: високотемпературний нагрів, гібридна декарбонізація, ексергетичний ККД, метано-водневі суміші, цифрові двійники, штучний інтелект.

FORECASTING THE MODERN CHOICE OF FUELS FOR INDUSTRY AND ENERGY USING ARTIFICIAL INTELLIGENCE UNDER CONDITIONS OF HYBRID DECARBONIZATION

B. Soroka¹, D. Fedorov^{2*}, A. Lyba³

The Gas Institute, the NAS of Ukraine,
39, Dehtyariivska St., Kyiv, 03113, Ukraine,
*phone: +380997688886, e-mail: fedorov522@gmail.com

When solving the problems set in the work, methods of predictive modeling based on artificial intelligence algorithms, system analysis of macroeconomic databases, as well as methods of thermodynamic and thermophysical analysis of combustion processes of hybrid gas mixtures were used.

Key words: artificial intelligence, digital twin, exergetic efficiency, high-temperature heating, hybrid decarbonization, methane-hydrogen mixtures.

ORCID: ¹0000-0001-9174-0992; ²0009-0007-8291-7486; ³0009-0004-5107-6950.

Стан питання. Відповідно до Паризької кліматичної угоди 2015 року [1], стратегічною метою світової спільноти є мінімізація вуглецевого сліду (англ. Carbon footprint) та поступова відмова від використання викопних органічних палив. Проте ретроспективний аналіз темпів енергетичного переходу свідчить про наявність критичних технологічних бар'єрів, які унеможливають директивну декарбонізацію важкої промисловості та теплоенергетики виключно за рахунок відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та прямої електрифікації [2]. На сучасному етапі обґрунтованим є перехід до гібридної енергетичної моделі, яка базується на синергії традиційних і новітніх енергоносіїв, зокрема на використанні метано-водневих сумішей (CH_4/H_2) [3]. Враховуючи багатовимірність проблеми, що охоплює питання хімічної кінетики, термодинаміки, екології [4] та економічної безпеки, традиційні статистичні методи прогнозування вичерпали свою ефективність.

У цьому контексті актуальним альтернативним інструментом стає штучний інтелект (ШІ, Artificial Intelligence) [5] – найсучасніший напрям науки та технологій, що забезпечує аналіз, прогнозування та оптимізацію багатофакторних явищ, природних та антропогенних процесів, а також прогнозування подій з використанням кібернетичних можливостей. ШІ фокусується на накопиченні інформації наявного рівня та походження, забезпечуючи екстраполяцію оперативних даних, що аналізуються. При вирішенні задач промислової та паливної енергетики ШІ базується на цифровізації, кібернетичній універсальності, гнучкості та прилаштуванні (Cyber Resilience Ext - CRE), фізично обґрунтованих термічних процесах (Intelligent Heating), енергетичному менеджменті, енергоефективності, а також на пальникових технологіях і прикладній теорії горіння.

Виходячи з цього, метою даного дослідження є обґрунтування використання алгоритмів ШІ та концепції цифрових двійників теплових агрегатів [6] для багатокритеріальної оптимізації вибору гібридних паливних сумішей з урахуванням макроекономічних та теплофізичних обмежень.

1. Структурний аналіз паливного балансу промисловості та енергетики в умовах декарбонізації. Для верифікації необхідності застосування предиктивних ШІ-моделей було проведено системний аналіз масивів даних Eurostat щодо динаміки паливного балансу ЄС за період 1990-2024 рр. [7]. Результати свідчать про глибоку дис-

пропорцію у темпах заміщення вуглецевих палив між різними секторами економіки. У секторі генерації електроенергії (рис. 1) спостерігається успішна трансформація: крива зростання частки ВДЕ математично перетнула криву споживання викопних палив, формуючи позитивний ефект «ножиць».

Аналіз стану декарбонізації, який часто базується на показниках електрогенерації, потребує урахування структури кінцевого енергоспоживання. За даними європейської статистики, електрична енергія становить лише близько 20–25% у загальному балансі кінцевого споживання ЄС, тоді як процеси теплової генерації, охолодження та високотемпературного промислового нагрівання поглинають близько 50% первинної енергії [7]. При цьому до 70–75% усього природного газу (CH_4) спалюється безпосередньо в теплових агрегатах та промислових печах, а не на електростанціях.

Аналіз структури енергоспоживання у секторі важкої промисловості та високотемпературного нагріву (рис. 2) демонструє повну відсутність ефекту «ножиць». Тренди впровадження альтернативних джерел та споживання традиційного вуглець місткового палива розвиваються паралельно. Викопні палива продовжують залишатися домінуючими, утримуючи частку на рівні 70–85% залежно від системних коливань ринку. Стагнація декарбонізації в цьому сегменті пояснюється жорсткими фізичними обмеженнями: пряма електрифікація найенергоємніших високотемпературних технологічних процесів (зокрема, обортових випалювальних печей цементної промисловості, а також нагрівальних та термічних печей металургії) є термодинамічно неефективною. Це пов'язано з неможливістю забезпечення високої частки корисної складової наявної енергії введеного палива та специфічних умов забезпечення потужного радіаційного теплообміну: остання вимагає утворення світлого факела при спалюванні природного газу в «non-premix» пальниках [1]. Як підтверджують останні дослідження, проведені для Федерального агентства з охорони довкілля Німеччини (UBA), для генерування масового технологічного тепла з температурою понад 500 °C пряма електрифікація стикається з критичними бар'єрами, тому застосування хімічних енергоносіїв (зокрема гібридних газових сумішей) залишається безальтернативним [2].

Отримана статистична картина доводить, що очікування швидкої і повної відмови від вуглеводнів у промисловій теплоенергетиці є технологічно необґрунтованими. Оскільки металургія та виробництво будматеріалів генерують лівову частку викидів CO_2 через спалювання палива, стагнація в цих секторах повністю нівелює екологічні досягнення зеленої електроенергетики. Подолання цієї кризи вимагає переходу від констатації статистичних трендів до предиктивного моделювання. Застосування алгоритмів ШІ [5, 6] дозволяє розрахувати оптимальні сценарії штучного зближення трендів шляхом впровадження гібридних метано-водневих палив (CH_4/H_2) [3], що здатні забезпечити зниження емісії без втрати корисної складової наявної енергії введеного палива.

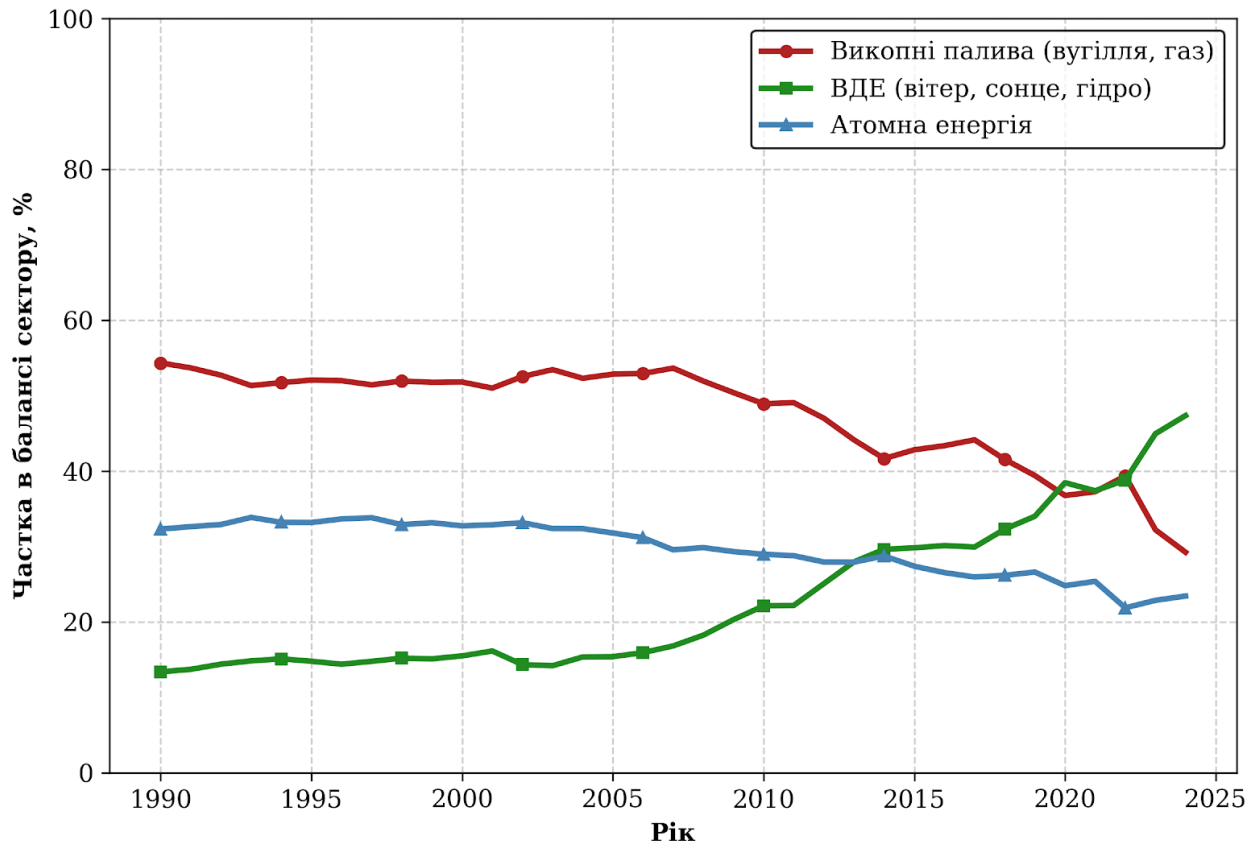


Рис. 1. Динаміка зміни первинних джерел енергії в структурі електрогенерації ЄС (1990–2024 рр.)

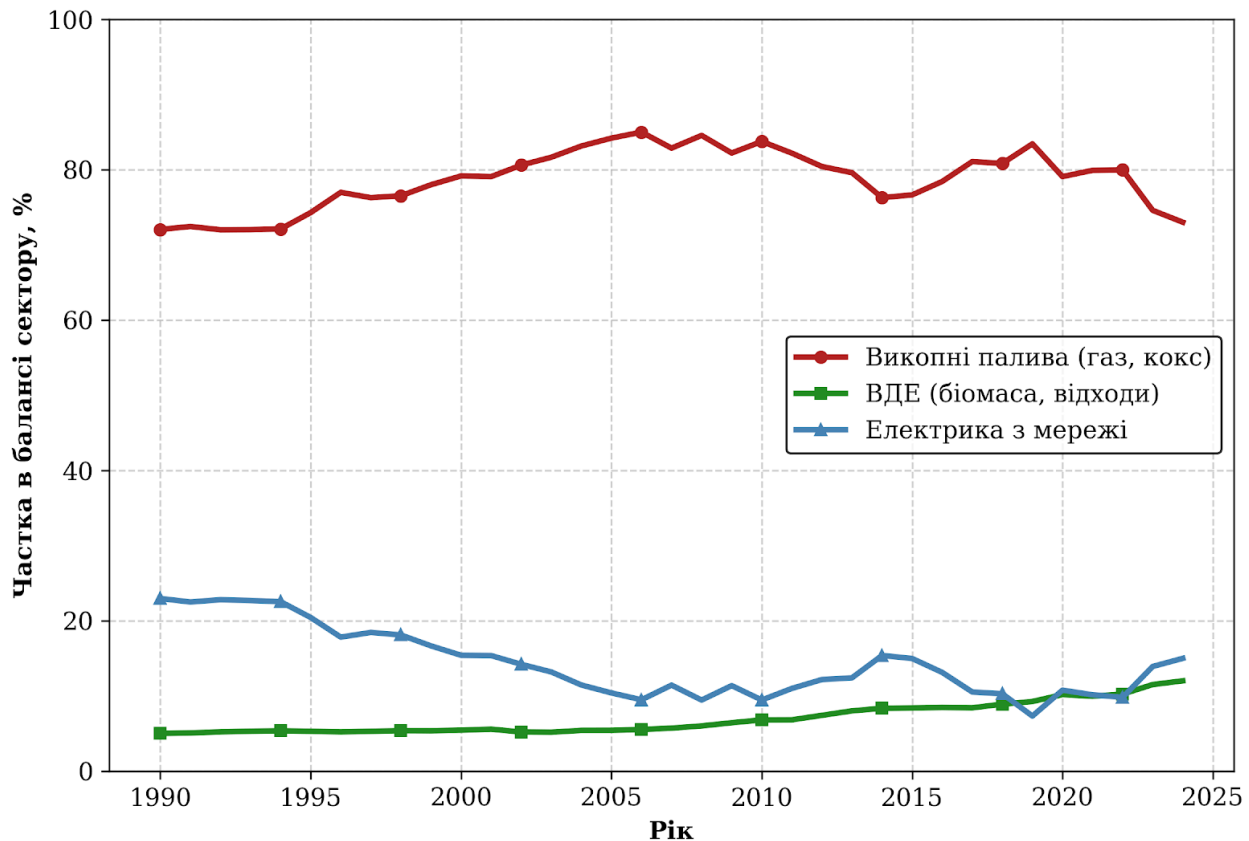


Рис. 2. Динаміка зміни первинних джерел енергії в паливному балансі процесів промислового нагрівання в країнах ЄС (1990–2024 рр.)

2. Предиктивне моделювання ШІ: реалістичний сценарій декарбонізації в промисловій теплоенергетиці.

З метою подолання виявленої стагнації в тепловій енергетиці було розроблено алгоритм предиктивного моделювання на базі ШІ, який екстраполює сценарії споживання палива після підписання Паризької угоди 2015 року [1]. На відміну від спрощених експоненціальних моделей падіння споживання, запропонований алгоритм базується на концепції цифрових двійників (Digital Twins) [6] та враховує три ключові фактори структурної трансформації паливного балансу. По-перше, алгоритм зберігає макроекономічну гнучкість та пристосованість: крива прогнозу ШІ корелює з реальними економічними шоками (кризи 2020 та 2022 рр.), оскільки енергоспоживання жорстко прив'язане до обсягів виробництва. По-друге, модель враховує інфраструктурну інерційність впровадження водневих технологій, що описується S-подібною логістичною функцією. Перехід на гібридне паливо вимагає масштабних інвестицій та часу на адаптацію газових мереж та газовикористовуючого обладнання, за цієї причини інтенсивне розходження фактичного та прогнозованого трендів починається лише з 2019-2020 років.

По-третє, ШІ-модель містить жорсткі інженерні обмеження щодо безпеки експлуатації агрегатів. Враховуючи високу швидкість ламінарного полум'я водню, повна відмова від метану в короткостроковій перспективі є небезпечною через пожежо-вибухо детонаційну обмеженість процесів горіння в *premix* Гензенівських пальника, а також ризику проскоку полум'я в змішувач. Тому алгоритм розраховує безпечну асимптоту (плато): для побутових мереж гранична частка водню в паливі (CH_4/H_2) обмежується на рівні 20–30% об., тоді як для промислових печей, за умови їх глибокої модернізації (*retrofit*), ця частка може бути безпечно доведена до 60–80% (використання *post-premix* пальників) [3]. Залишковий метан (CH_4) у суміші виконує критично важливу функцію стабілізатора полум'я та хімічного відновлювача. Результати моделювання (рис. 3) демонструють, що замість технологічно недовсяжного «нульового» споживання вуглеводнів, результати предиктивного моделювання на основі ШІ вказують на можливість виведення енергетики на плато гібридного заміщення (CH_4/H_2). Заштрихована зона на графіку ілюструє упущений екологічний потенціал ЄС, який виник через зволікання з впровадженням систем оптимізованого багатокритеріального керування процесами горіння.

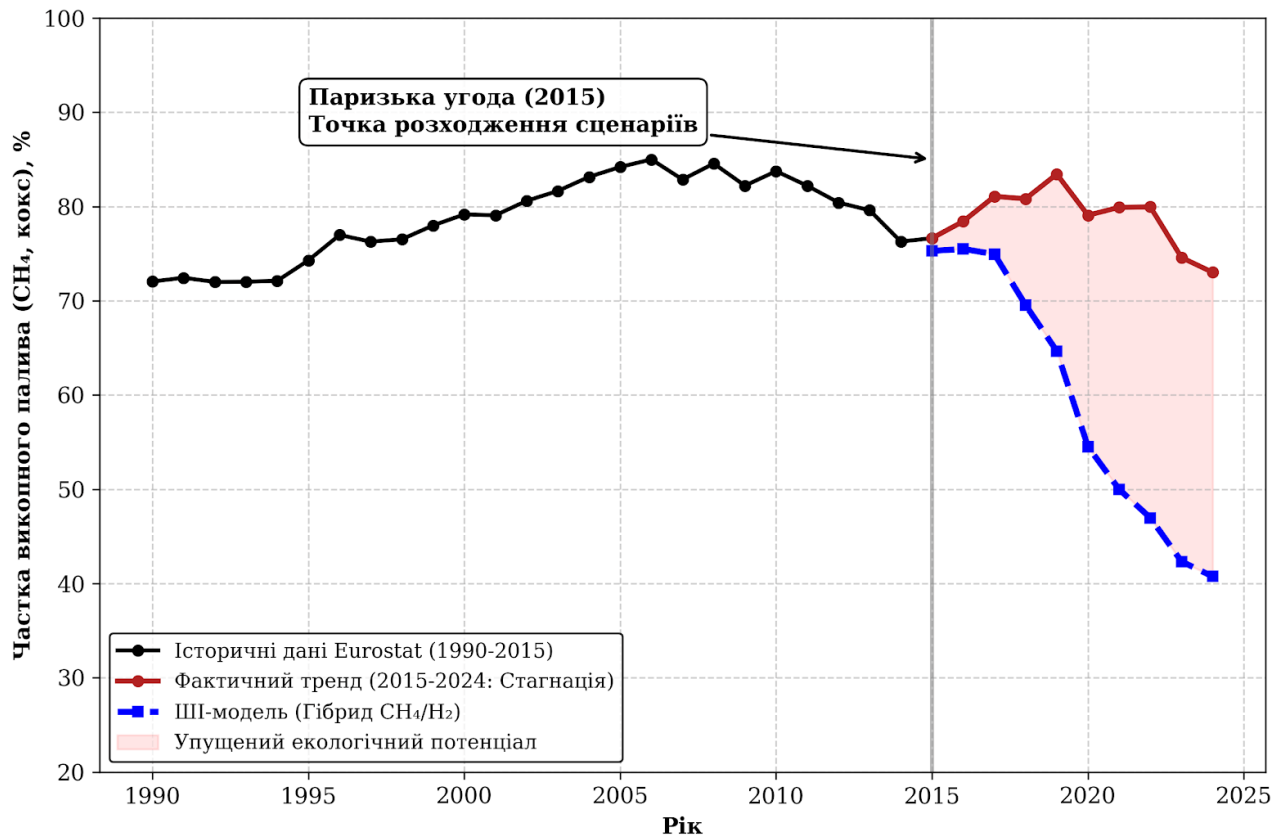
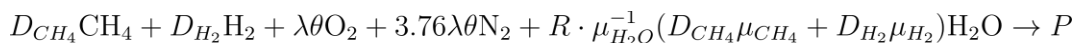


Рис. 3. Фактичне споживання викопного палива (Eurostat, 1990–2024 pp.) порівняно з ШІ-оптимізованим сценарієм переходу на гібридні суміші CH₄/H₂ з урахуванням макроекономічних та інфраструктурних обмежень

3. Термодинамічна та екологічна оптимізація гібридних сумішей. Перехід до прогнозованого керування паливним балансом на макрорівні вимагає забезпечення ефективності згоряння сумішей CH₄/H₂ на мікрорівні теплового агрегату. З позицій сучасної термодинаміки [8], високотемпературний промисловий нагрів є процесом у відкритій системі, що характеризується фундаментальною термодинамічною суперечністю: заміщення вуглецьмісткого CH₄ на безвуглецевий H₂ усуває емісію CO₂, проте спричиняє зростання теоретичної температури горіння T₁ як вищого потенціалу процесу. Це неминує призводить до інтенсивного окислення атмосферного азоту з утворенням токсичних термічних NO_x, зокрема за механізмом Я. Б. Зельдовича.

Розглянемо задачу на прикладі процесу горіння метано-водневої суміші (гібридне паливо) при додаванні у факел водяної пари. Вирішення проблеми вимагає застосування методів машинного навчання [5] та переходу від традиційної максимізації ентальпійного ККД до алгоритмів багатокритеріальної оптимізації. Відповідно до розробленої термодинамічної парадигми [3], цифровий двійник теплового агрегату дозволяє вирішити обернену задачу: забезпечується динамічний розрахунок та дозує водяну пару (H₂O) безпосередньо у корінь факела. Хіміко-математична модель горіння гібридного палива з коефіцієнтом надлишку повітря (λ) та інжекцією пари описується наступним рівнянням матеріального балансу:



де P — продукти згоряння; D_{H₂} та D_{CH₄} — об'ємні частки водню та метану відповідно (D_{CH₄} + D_{H₂} = 1); θ = 1.5 D_{CH₄} + 0.5 — стехіометрична потреба в кисні; μ_{CH₄}, μ_{H₂} та μ_{H₂O} — молярні маси метану, водню та води відповідно; R = m_{H₂O} / m_f — відносний масовий потік пари по відношенню до сумарної масової витрати палива (m_f).

Цільовою функцією алгоритму ШІ є пошук такої величини R, яка забезпечує жорстке утримання температури гібридної суміші на еталонному рівні горіння чистого метану (T₁ = 2226 K) незалежно від об'ємної частки D_{H₂}. Для забезпечення високої фізичної достовірності розрахунків при температурах понад 2000 K алгоритм використовує 7-коефіцієнтні поліноми фундаментальної бази даних NASA [9], що дозволяє коректно враховувати високотемпературну хімічну дисоціацію газів. Розрахунки підтверджують, що для виконання умови T₁ = 2226 K при спалюванні 100% H₂ відносний масовий потік інжектваної пари (R) повинен сягати ~135% по відношенню до витрат палива.

За умов парового баластування топкового процесу вдається отримати комплексну характеристику ідеальної печі, яка поєднує класичну оцінку принципів роботи теплових машин із закономірностями складних макроскопічних

систем [8]. До складу енергетичних критеріїв відноситься ККД ідеального прямого циклу Карно, що розраховується за характеристичними температурами T_1 та T_2 . У нашому випадку цей ККД чисельно відповідає ексергетичному (ефективному) ККД η_{eff} . Крім того, для ідеального випадку представлено ентальпійний ККД (η_H), розрахований через повні (хімічні) ентальпії. Згідно з постановкою задачі, розглядається випадок, коли завдяки динамічному додаванню водяної пари в топкову камеру підтримується незмінна вища (за Карно) температура горіння $T_1 = 2226$ К, яка відповідає спалюванню метану (природного газу). Відходячи з робочого простору при нижчій характеристичній температурі $T_2 = 1300$ К, значний масовий потік пари виносить із собою значну кількість теплоти. Внаслідок цього ентальпійний ККД закономірно знижується (орієнтовно з 60% до 48%). Натомість ексергетичний ККД ($\eta_{\text{eff}} = 1 - T_2 / T_1$) є абсолютно незмінною величиною, оскільки за умови фіксації ШІ-двійником температур T_1 та T_2 при зміні складу палива стабільно підтримується ефективний ККД. Крім того, незважаючи на відсутність світимого сажистого факела при спалюванні водню, інжектвана трьохатомна водяна пара суттєво підвищує парціальний тиск продуктів згоряння $p_{\text{H}_2\text{O}}$. Це забезпечує зростання оптичної щільності та ступеня чорноти (ϵ) газового об'єму в топці, що дозволяє зберегти високу густину радіаційного теплового потоку на матеріал, що нагрівається.

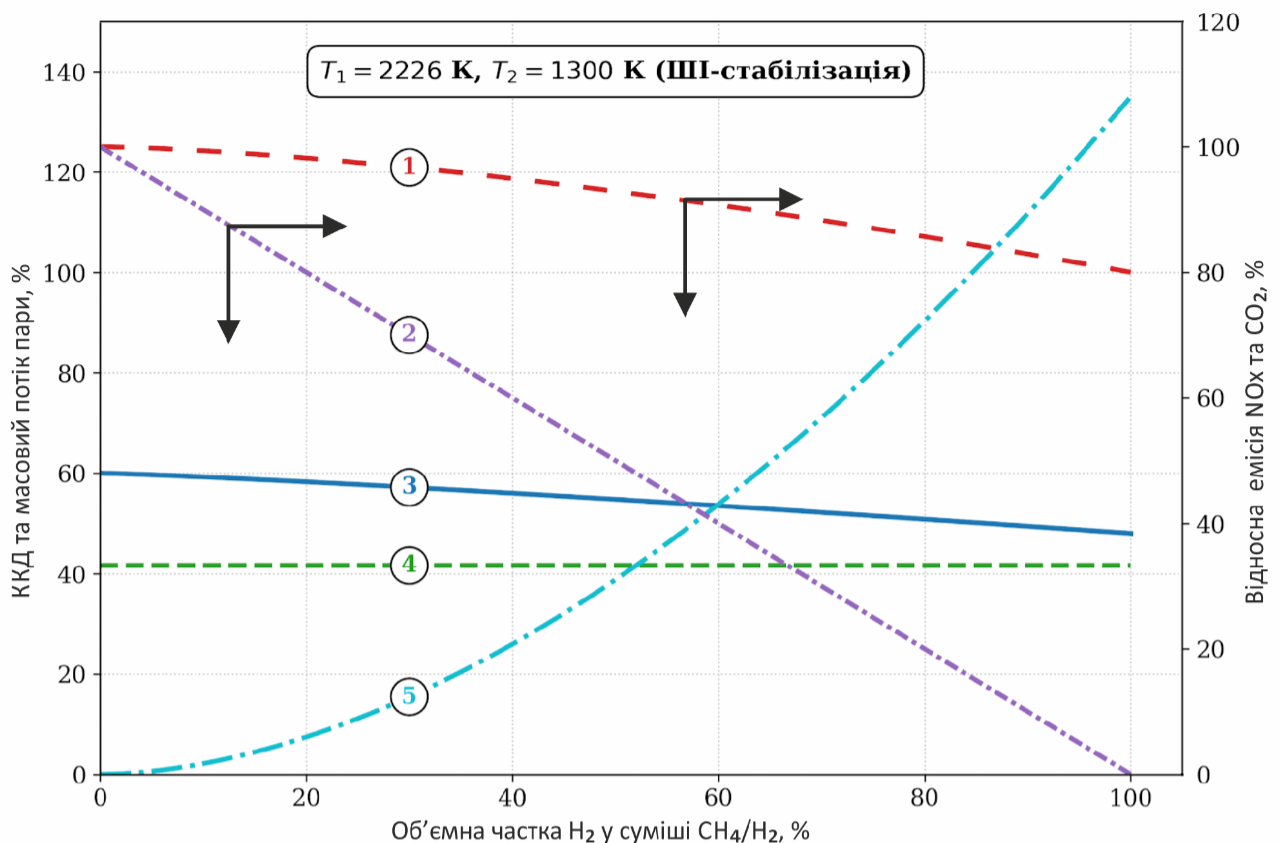


Рис. 4. Комплексна характеристика ідеальної печі при ШІ-оптимізації спалювання сумішей CH_4/H_2 палива: вплив управління відносним масовим потоком пари на екологічні та енергетичні показники.

- 1 - відносна емісія термічних NO_x ;
- 2 - відносна емісія CO_2 ;
- 3 - ентальпійний ККД (η_H);
- 4 - ексергетичний (ефективний) ККД (η_{eff}) за ідеальним прямим циклом Карно при характеристичних температурах $T_1 = 2226$ К та $T_2 = 1300$ К;
- 5 - відносний масовий потік пари (R).

Висновки. Статистичний аналіз європейського енергоспоживання засвідчив відставання темпів декарбонізації докільля у процесах теплової обробки матеріалів в промисловості; згадані процеси забезпечуються в основному органічним паливом і потребують близько 50% наявних енергоресурсів. При цьому високотемпературні термічні технології реалізуються за рахунок радіаційного переносу енергії, первинні джерела якої становлять компоненти продуктів згоряння. За цієї причини пряма електрифікація найбільш енергоємних високотемпературних технологічних процесів є недостатньо термодинамічно ефективною. Побудовані на основі алгоритмів штучного інтелекту прогнозовані (предиктивні) моделі доводять, що обґрунтованим компромісним шляхом розвитку промислової теплоенергетики є структурна трансформація з використанням метано-водневих сумішей (CH_4/H_2).

Застосування ШІ в сполученні з концепцією цифрових двійників дозволяє оптимізувати процес горіння шляхом вирішення оберненої термодинамічної задачі та формування комплексної характеристики ідеальної печі. Динамічне управління відносним масовим потоком баластної пари забезпечує скорочення емісії термічних NO_x та CO_2 за рахунок обмеження характеристичної температури горіння T_1 сумішевого (гібридного) палива та інтенсифікації радіаційно-конвективного теплообміну завдяки зростанню ступеня чорноти ϵ газового об'єму. Такий підхід гарантує екологічну безпеку та скорочення викиду парникових газів експлуатації теплової інфраструктури, об'єктивно враховуючи при цьому фундаментальні термодинамічні обмеження: закономірне зниження традиційного ентальпійного ККД (η_H) через винесення теплоти масивним потоком пари повністю компенсується збереженням стабільного ексергетичного (ефективного) ККД (η_{eff}). Завдяки штучному утриманню незмінних характеристичних температур T_1 та T_2 , ефективність печі за ідеальним прямим циклом Карно залишається незмінною незалежно від глибини водневого заміщення природного газу (метану) в складі палива.

ПОСИЛАННЯ

1. Bataille C., Åhman M., Neuhoﬀ K. et al. A review of technology and policy deep decarbonization pathway options for making energy-intensive industry production consistent with the Paris Agreement. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 187. P. 960-973.
2. Schwotzer C., Rothhöft K., Fleiter T., Rehfeldt M., Jäger-Gildemeister F. CO₂-neutral process heat generation – a study for the Federal Environment Agency of Germany. *Heat Processing*. 2024. № 2. P. 24-30.
3. Soroka B. S., Zgurskyi V. O. Selection the fuel composition for industrial furnaces to control the climate impact. Part 1. Decarbonization of environment by natural gas admixing with hydrogen in conditions of hybrid energy supply of industry. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2025. № 2. С. 5-21. DOI: 10.33070/etars.2.2025.01.
4. Сорока Б. С., Згурський В. О., Кудрявцев В. С. Скорочення викидів CO₂ при спалюванні природного газу з повітрям, збагаченим киснем, як засіб попередження парникового ефекту в атмосфері. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2023. № 4. С. 3-25. DOI: 10.33070/etars.4.2023.01.
5. Prieler R., Moser M., Eckart S., Krause H., Hochenauer C. Machine learning techniques to predict the flame state, temperature and species concentrations in counter-flow diffusion flames operated with CH₄/CO/H₂-air mixtures. *Fuel*. 2022. Vol. 326. P. 124915.
6. Yu J., Petersen N., Liu P., Li Z., Wirsum M. Hybrid modelling and simulation of thermal systems of in-service power plants for digital twin development. *Energy*. 2022. Vol. 260. P. 125088.
7. Energy production and imports. Eurostat Data Browser. URL: https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/nrg_bal_s/default/table?lang=en (дата звернення: 28.02.2026).
8. Kondepudi D., Prigogine I. *Modern Thermodynamics: From Heat Engines to Dissipative Structures*. Second Edition. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2015. 560 p.
9. Gordon S., McBride B. J. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications. Part 1: Analysis. NASA Reference Publication 1311. Cleveland, Ohio: NASA Glenn Research Center, 1994.

ОЦІНКА РЕГІОНАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ТА СТРАТЕГІЧНІ ПЕРСПЕКТИВИ ФОРМУВАННЯ ВОДНЕВИХ ДОЛИН В УКРАЇНІ

М. О. Карпаш¹, Л. Я. Жовтуля², Н.-А. Ю. Сорока³

*Заклад Вищої Освіти «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 створення водневих долин в областях України, охоплюючи потенціал ВДЕ, наявності водних ресурсів, інфраструктури та потенційного споживання.

Ключові слова: воднева долина, відновлювана енергетика, водневий ланцюжок створення вартості, промисловість.

ASSESSMENT OF REGIONAL POTENTIAL AND STRATEGIC PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN VALLEYS IN UKRAINE

M. O. Karpash¹, L. Y. Zhovtulia², N.-A. Y. Soroka³

*Institute of Higher Education King Danylo University,
35 Yevgena Konovaltza str., Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76018
phone: (095) 207-32-27, e-mail: nazarii.soroka@ukd.edu.ua*

In addressing the objectives set forth in this study, general methods of theoretical analysis were employed to examine the issue of establishing hydrogen valleys in the regions of Ukraine, taking into account the potential of renewable energy sources, the availability of water resources, infrastructure, and potential consumption.

Key words: Hydrogen Valley, renewable energy, hydrogen value chain, industry.

ORCID: ¹0000-0002-4223-3828; ²0000-0001-5255-8522; ³0000-0002-8549-7014.

Розвиток водневої енергетики в Європі та світі перейшов від стадії поодиноких демонстраційних проєктів до масштабного розгортання інтегрованих екосистем, відомих як водневі долини. Згідно з визначенням Clean Hydrogen Partnership, воднева долина — це географічно визначена область (місто, регіон, острів або промисловий кластер), де кілька водневих застосувань об'єднані в інтегровану екосистему, що охоплює весь ланцюжок створення вартості: від виробництва та зберігання до розподілу та кінцевого споживання [1]. Ця концепція була ідентифікована в плані REPowerEU як ключовий інструмент масштабування водневої економіки, з амбітною метою подвоїти кількість таких долин у Європі до 2025 року та мати щонайменше 50 об'єктів у стані будівництва або експлуатації до 2030 року [1].

Водневі долини класифікуються за трьома основними архетипами. Перший — це маломасштабні локальні проєкти, орієнтовані переважно на декарбонізацію міської мобільності та громадського транспорту. Другий — середньомасштабні промислові кластери, де виробництво водню інтегроване з хімічними чи металургійними підприємствами для зниження викидів вуглецю. Третій — великомасштабні експортно-орієнтовані проєкти, призначені для міжнародної торгівлі енергоносіями [2]. Україна, завдяки своєму унікальному географічному положенню та ресурсному потенціалу, має перспективи розвитку всіх трьох типів, інтегруючи національну інфраструктуру в загальноєвропейські коридори [3].

Україна розглядається Європейським Союзом як пріоритетний партнер у реалізації Європейської зеленої угоди. Проєкт Водневої стратегії України до 2050 року, оприлюднений Міністерством енергетики, передбачає амбітні показники виробництва: 1,3 млн тонн водню до 2035 року та 3 млн тонн до 2050 року [4]. Реалізація цих цілей вимагає капіталовкладень у розмірі щонайменше 100 млрд доларів, що охоплюють будівництво відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), електролізних потужностей та модернізацію транспортувальної мережі [4].

Центральним елементом стратегії є перехід від традиційного «сірого» водню, отриманого з викопного палива, до «зеленого» водню, виробленого методом електролізу води з використанням енергії вітру, сонця та гідроресурсів

[5]. Очікується, що приведена вартість водню (LCOH) знизиться з поточних рівнів до 2,5–4,0 доларів за кілограм до 2030 року і досягне 1–2 доларів до 2050 року, що зробить зелений водень конкурентоспроможним на ринку [6].

Водень в Україні не є новою речовиною — він десятиліттями використовується в хімічній промисловості. Проте перехід на «зелений» водень вимагає фундаментальної зміни технологічних процесів. Ефективність створення водневої долини в конкретному регіоні залежить від балансу наступних факторів: потенціалу ВДЕ, наявності водних ресурсів, інфраструктури розподілу і зберігання водню (наприклад, наявної газотранспортної, що готова до перепрофілювання), та споживання. Дослідження Інституту відновлюваної енергетики НАН України вказують на загальний річний потенціал виробництва зеленого водню на рівні 505 млрд. нм³ (враховуючи офшорні зони) [5].

Південні області України володіють найвищим потенціалом завдяки стабільним вітровим потокам та високій сонячній інсоляції, але мають обмежені ресурси прісної води. Регіон має доступ до Азовського та Чорного моря, що може вирішити проблему забезпечення електролізерів водою через опріснення [5]. Південь України також має розвинену портову інфраструктуру, яка може забезпечити локальне споживання суднобудівними та енергетичними підприємствами, як для прикладу реалізовано у Port of Amsterdam [7]. На півдні України уже реалізується проєкт «H2U Hydrogen Valley» у місті Рені, що передбачає будівництво СЕС на 120 МВт та ВЕС на 80 МВт для живлення електролізної установки потужністю 100 МВт [8].

Схід України — це основний ринок внутрішнього споживання водню для металургії, машинобудування та виробництва хімікатів. Регіон має критичне значення для стабільності об'єднаної енергетичної системи завдяки концентрації генерації, а також має наявні підземні сховища газу (ПСГ).

Західні області є ключовими для фізичного зв'язку України з європейською мережею Hydrogen Backbone. Вони не володіють значним потенціалом ВДЕ, порівняно із південними областями, однак загалом мають достатньо водних ресурсів для забезпечення виробництва зеленого водню. Наявна розвинена газотранспортна інфраструктура та ПСГ, проте відсутні великі промислові кластери, які забезпечили б локальне споживання. Загалом споживання водню в регіоні можуть забезпечити нафтохімічні підприємства, виробництво цементу та аміаку, а також можливе застосування у залізничному транспорті, оскільки електрифікація залізниці у гірських регіонах потребує значних капіталовкладень. У Закарпатті реалізується «Воднева долина Закарпаття», що планує постачати водень трубопроводом до металургійного заводу в Кошицях (Словаччина) [9]. Проєкт передбачає будівництво ВЕС 80-160 МВт та СЕС 120 МВт у горах, що викликає екологічні дискусії.

Центральні та північні області України, в залежності від розташування, мають розвинену інфраструктуру СЕС та малих ГЕС [9], і мають значний потенціал біоенергетики [5], однак деякі області мають значний дефіцит водних ресурсів. Основними споживачами можуть виступати виробництво зеленого аміаку, дата центри та міський транспорт. Суми мають пілотний проєкт «H2 Production Sumy» на 110 МВт [9].

Незважаючи на колосальний потенціал, існують суттєві перешкоди, які потребують системного вирішення на державному рівні. Значна частина потенціалу ВДЕ (особливо вітрового) знаходиться на окупованих територіях або в зонах активних бойових дій [3]. Пошкодження Каховської ГЕС та обстріли енергетичних об'єктів у Рені вже ускладнили фінансування пілотних проєктів [10]. Додатковим бар'єром є наявність ресурсів. Наприклад, виробництво електролізерів потребує металів платинової групи та інших рідкоземельних елементів, доступність яких у глобальному масштабі обмежена [11]. Конкуренція за воду між водневою галуззю, сільським господарством та населенням може стати соціально-політичним викликом, перш за все, у південних регіонах, однак буде актуальною для інших областей із дефіцитом водних ресурсів [3]. Також варто відзначити наявність регуляторних бар'єрів, таких як відсутність прийнятої національної стратегії та законодавчої бази щодо ринку водню в Україні, що додатково стримує інвесторів, окрім ризиків, пов'язаних із воєнними діями.

ПОСИЛАННЯ

1. Small-scale Hydrogen Valley: Horizon-europe.gouv.fr. URL: <https://www.horizon-europe.gouv.fr/small-scale-hydrogen-valley-43284> (дата звернення: 17.03.2026).
2. Framework Conditions for Hydrogen Valleys in the EU: Understanding Legal Barriers to Cross-Sectoral Regulation: Global Energy Law and Sustainability - Edinburgh University Press. URL: <https://www.euppublishing.com/doi/10.3366/gels.2025.0143> (дата звернення: 17.03.2026).
3. HYPAT Working Paper 04/2023. Ukrainian Hydrogen Export Potential: Opportunities and Challenges in the Light of the Ongoing War: Fraunhofer ISI. URL: https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cce/2023/HYPAT%20WP_04-2023_Ukrainian%20hydrogen%20export%20potential_final_V01.pdf (дата звернення: 17.03.2026).

4. Міненерго оприлюднило проєкт водневої стратегії до 2050 року: Укрінформ. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/3864944-minenergo-opriludnilo-proekt-vodnevoi-strategii-do-2050-roku.html> (дата звернення: 18.03.2026).
5. Hydrogen Strategy of Ukraine: Project: Institute for Renewable Energy at the National Academy of Sciences of Ukraine. Kyiv, 2021. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/ENG-Hydra-Beauty-final.pdf> (дата звернення: 18.03.2026).
6. ПРОЄКТ ВОДНЕВА СТРАТЕГІЯ УКРАЇНИ на період до 2050 року: Міністерство енергетики України. URL: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf> (дата звернення: 19.03.2026).
7. Hydrogen: Port of Amsterdam. URL: <https://www.portofamsterdam.com/en/business/cargo-flows/liquid-bulk/hydrogen> (дата звернення: 19.03.2026).
8. Ukraine: Green Hydrogen Organisation. URL: <https://gh2.org/countries/ukraine> (дата звернення: 19.03.2026).
9. The hydrogen opportunity – Unlocking Ukraine's Hydrogen Opportunity: A Roadmap: Analysis - IEA. URL: <https://www.iea.org/reports/unlocking-ukraines-hydrogen-opportunity-a-roadmap/the-hydrogen-opportunity> (дата звернення: 23.03.2026).
10. В Ізмаїльському районі приватна компанія збудує завод з виробництва екологічного пального: Південь сьогодні. URL: <https://yug.today/v-izmailskomu-rayoni-pryvatna-kompaniia-zbuduie-zavod-z-vyrobnystva-ekolohichnoho-palnoho/> (дата звернення: 23.03.2026).
11. Hydrogen Europe Position Paper: Input to H2V Roadmap: Hydrogen Europe. URL: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2023/09/HE-Input-to-H2V-Roadmap_final-version-.pdf (дата звернення: 25.03.2026).

PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF THE HYDROGEN ECONOMY IN GERMANY AND THE APPLICATION OF ENERGY SYSTEM OPTIMIZATION MODELS

Dr. Tashcheiev Y.

Gastwissenschaftler

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

Institut für Statistik und Ökonometrie

1. Introduction

The transition toward a climate-neutral energy system is one of the central challenges of the European Union. Hydrogen is considered a key element of the energy transition, particularly in sectors such as heavy industry, transport, and long-term energy storage. Germany currently occupies a leading position in the development of the hydrogen economy due to active governmental policy, significant investments in infrastructure, and extensive scientific research.

The German National Hydrogen Strategy provides a framework for the large-scale deployment of green hydrogen produced from renewable energy sources and the development of the corresponding infrastructure for transportation and storage [1].

2. Development of the Hydrogen Economy in Germany

In recent years Germany has significantly intensified efforts aimed at establishing hydrogen infrastructure. One of the key elements is the development of a pan-European hydrogen transport network. Within the European Hydrogen Backbone initiative, more than 30,000 km of hydrogen pipelines are expected to be developed across Europe by 2040 [2].

Germany is also implementing the H2Global program, designed to stimulate international trade in green hydrogen and its derivatives and to accelerate market development [3].

In addition, large-scale hydrogen production projects are being developed, particularly those associated with offshore wind energy resources in the North Sea.

The expansion of hydrogen technologies is also supported by European industrial initiatives such as the Important Projects of Common European Interest (IPCEI Hydrogen), which unite numerous industrial and research projects across Europe [4].

3. Mathematical Modelling of Hydrogen Energy Systems

The effective development of the hydrogen economy requires modern analytical and forecasting tools. In the scientific literature, energy system optimization models are widely used to evaluate the economic efficiency of different energy transition scenarios.

Among the most widely applied modelling frameworks are:

- TIMES / MARKAL – long-term energy system planning models [5]
- OSeMOSYS – an open-source energy system optimization model [6]
- PyPSA – a high-resolution power system and energy system modelling framework [7]
- Mixed-Integer Linear Programming (MILP) models used for hydrogen supply chain optimization

These models enable the analysis of hydrogen production via electrolysis, hydrogen transport infrastructure, energy storage, and interactions between hydrogen systems and electricity markets [7].

4. Example of an Optimization Model for a Hydrogen Energy System

One of the widely used tools for analysing energy systems in Europe is the PyPSA (Python for Power System Analysis) model. This modelling framework is actively used for research on the European and German energy systems [7].

The main objective of the model is to minimize the total system cost:

$$\text{Min } \Sigma (C_{\text{invest}} + C_{\text{operation}}) \quad (1).$$

where:

C_{invest} – capital investments in energy infrastructure

$C_{\text{operation}}$ – operational costs of the system

Subject to the following constraints.

Hydrogen production–demand balance:

$$H_{\text{production}}(t) = H_{\text{demand}}(t)$$

Electrolyzer capacity constraint:

$$H_{\text{production}}(t) \leq P_{\text{electrolyzer}}$$

Such modelling approaches allow researchers to determine optimal electrolyzer capacities, hydrogen storage volumes, and parameters of hydrogen transportation infrastructure.

5. Discussion and Perspectives

Results of energy system modelling studies indicate that hydrogen can play a crucial role in the decarbonization of sectors where direct electrification is technically difficult or economically inefficient [6].

For Germany, the most promising directions include:

- hydrogen production based on offshore wind energy in the North Sea
- development of hydrogen transport infrastructure
- application of hydrogen in the steel and chemical industries
- integration of hydrogen technologies into the European energy system

However, several challenges remain, including the reduction of electrolysis costs, the development of large-scale infrastructure, and the establishment of global hydrogen supply chains [2].

6. Conclusions

The development of the hydrogen economy represents a key component of the energy transition in Germany and the European Union. Governmental policy, large-scale investments, and international cooperation create favorable conditions for the emergence of a new hydrogen-based energy infrastructure [1].

Energy system optimization models provide important tools for evaluating different development scenarios and identifying economically efficient solutions for hydrogen deployment [7].

Future research should focus on improving modelling approaches for the integration of hydrogen technologies into energy systems and assessing their long-term impacts on sustainable energy development.

REFERENCES

1. The Federal Government of Germany. The National Hydrogen Strategy. Berlin, 2020.
2. Guidehouse. European Hydrogen Backbone: A European Hydrogen Infrastructure Vision. 2023.
3. BMWK. H2Global – Instrument for the Market Ramp-Up of Green Hydrogen.
4. European Commission. Important Projects of Common European Interest (IPCEI Hydrogen).
5. Loulou R., Labriet M. ETSAP-TIAM: the TIMES integrated assessment model. Energy Policy.
6. Howells M. et al. OSeMOSYS: The Open Source Energy Modeling System. Energy Policy.
7. Brown T., Hörsch J., Schlachtberger D. PyPSA: Python for Power System Analysis. Journal of Open Research Software.

АКТУАЛЬНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ПРОЄКТУ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ВОДНЕВОЇ СТРАТЕГІЇ УКРАЇНИ

М. П. Кузнєцов

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

Досягнення кліматичної нейтральності до середини поточного століття є пріоритетним завданням Паризької кліматичної угоди та Європейського зеленого курсу. Використання відновлюваного (так званого зеленого) водню визначено як один з важливих факторів енергетичного переходу. Розвиток водневих технологій потребує міжнародної співпраці, а інвестиційна політика базується на можливості торгівлі зеленим воднем. Однак це потребує сертифікації походження водню саме як відновлюваного, а отже міжнародно прийнятих правил такої сертифікації.

Ключові слова: кліматична нейтральність, відновлювані джерела енергії, зелений водень, сертифікація.

RELEVANCE OF FINDINGS FOR THE IMPLEMENTATION OF UKRAINE'S HYDROGEN STRATEGY

Mykola Kuznietsov

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

Achieving climate neutrality by the middle of this century is a priority task of the Paris Climate Agreement and the European Green Deal. The use of renewable (so-called green) hydrogen is one of the important factors of the energy transition. The development of hydrogen technologies requires international cooperation, and investment policy is based on the possibility of trading green hydrogen. However, this requires certification of the origin of hydrogen as renewable, and therefore internationally accepted rules for such certification.

Key words: climate neutrality, renewable energy, green hydrogen, certification.

ORCID: 0000-0002-0497-7439.

Досягнення кліматичної нейтральності до середини поточного століття є орієнтиром для держав-членів ЄС щодо енергетичної трансформації та переходу до надійного і сталого енергопостачання. Відповідно, Україна як держава-кандидат у члени ЄС має орієнтуватися на цю мету. Як зазначено в проєкті Водневої стратегії України, розробленому Інститутом відновлюваної енергетики НАН України (ІВЕ) 2021 року [1], цілі України, як одного із учасників Паризької кліматичної угоди – це скорочення викидів CO₂ на 40% до 2030 року; амбітна ціль до 2050 року – скорочення на 70%. Такі скорочення неможливо здійснити при традиційній структурі вітчизняної енергетичної системи. Використання відновлюваного (так званого зеленого) водню визначено як один з важливих факторів енергетичного переходу. Україна має прийняти відповідні законодавчі норми і шукати шляхи для адаптації стандартів ЄС, необхідних для роботи водневої галузі в Україні і для встановлення широкомасштабної довготривалої співпраці з метою залучення інвестицій, направлених на виробництво і експорт зеленого водню. Україна має приймати активну участь у розробці та адаптації міжнародних правил сертифікації і визначенні походження зеленого водню із подальшим їх швидким впровадженням в Україні у співпраці із авторитетними організаціями для забезпечення необхідного рівня довіри.

Протягом останніх років понад 50 країн у світі затвердили свої національні водневі стратегії, зелені книги, дорожні карти та інші стратегічні документи, які визначають пріоритетні напрямки та державні політики з розвитку водневої енергетики як на національному, так і на міжнародному рівні. Урядом України була розроблена «Воднева стратегія України на період до 2050 року» [2], яка визначає основні сфери використання водню в Україні, а саме промисловість, електроенергетику, транспорт, теплопостачання, включаючи можливості експорту, а також процеси його виробництва, зберігання та транспортування. Розвиток водневої енергетики від окремої вузької галузі до глобальної вимагає інтегрованого підходу із формування та реалізації державної політики для подолання початкових викликів на етапі становлення галузі та досягнення інтеграції водневих технологій в існуючі енергетичні ринки.

У лютому 2023 року між Урядом України та Європейською Комісією підписано Меморандум про взаєморозуміння щодо стратегічного партнерства у сфері біометану, водню та інших синтетичних газів. Ключовими аспектами співробітництва у сфері водневої енергетики є, зокрема, узгодження процедури сертифікації відповідно до вимог ЄС щодо

імпорту водню та інших синтетичних газів. Виробництво та подальше використання відновлюваного водню сприятиме зменшенню використання традиційних видів палива у різних секторах національної економіки, а отже, її декарбонізації, а також вирішенню викликів для енергосистеми в частині забезпечення сталості генерації, підвищення надійності енергопостачання, перенесення сезонних змін попиту на електричну енергію [3]. Водночас така електрична енергія може бути виробленою з використанням традиційних джерел, як наслідок, отриманий водень не буде повністю відновлюваним. Для врегулювання цього питання необхідно запровадження механізму гарантій походження електричної енергії, сертифікації та підтвердження походження водню. Гармонізовані системи сертифікації сприятимуть мінімізації витрат на виконання вимог для розробників відповідних проєктів та виробників обладнання, а також дозволять збільшити можливості для розвитку галузі. Україна має впроваджувати національні вимоги до сертифікації та підтвердження походження водню відповідно до світових практик, в першу чергу вимог ЄС.

Секретаріат Енергетичного Співтовариства ще 2020 року рекомендував Україні створити систему гарантій походження (ГП). У 2023 році вдалося запустити механізм гарантій походження прийняттям Закону України [4].

Відповідно до «Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року» [5] загальний теоретичний потенціал середньорічного виробітку відновлюваного водню оцінено в 45 млн. тонн. Реальні можливості, за оцінками експертів USAID, в перспективі становлять 0,5-1,9 млн тонн зеленого водню; близько третини становитимуть внутрішні потреби, решта – експортний потенціал. Загалом Україна може задовольнити до 10% потреб Європи. Наразі при світовому попиті на водень на рівні 100 млн тонн (в Європі 7% з них, дані IEA), використання викопного палива домінує при виробництві водню, причому водень з низькими викидами становить менше 1% від загального обсягу. Очікується, що до 2030 року світове виробництво водню з низьким рівнем викидів досягне 4,2 млн тонн на рік, що у п'ять разів більше порівняно з 2024 роком [6].

Інститутом відновлюваної енергетики запропоновано методики визначення потенціалу відновлюваної енергії та виробництва зеленого водню із детальним описом кроків, необхідних параметрів та даних для розрахунку потенціалу з урахуванням наявних обмежень, передбачених діючими законодавчо-нормативними актами України. За результатами проведеної науково-дослідної роботи було надано відповідні методики розрахунку потенціалів і отримано дані щодо теоретично досяжної потужності та можливого потенціалу середньорічного виробництва електроенергії з відновлюваних джерел [7].

Метою представленого на конференції міжнародного проєкту щодо німецько-української дослідницької співпраці (IBE НАН України та IIR, Німеччина) з сертифікації зеленого водню є встановлення науково-орієнтованої співпраці для підтримки розроблення системи ідентифікації зеленого водню. Партнерство між двома дослідницькими установами має на меті науково підготувати важливу ланку в ланцюжку постачання сертифікованого зеленого водню між Україною та Німеччиною. Найважливішим етапом використання проєкту є наращування необхідного досвіду для розробки та функціонування транскордонної, міжнародно сумісної системи сертифікатів походження водню для торгівлі між Україною та ЄС (особливо Німеччиною) до 2026 року. Передаючи знання про підходи до верифікації та сертифікації в ЄС, проєкт сприяє безпеці інвестицій та експорту зеленого водню з України до ЄС та інших регіонів.

ПОСИЛАННЯ

1. Воднева стратегія України. Проєкт. Інститут відновлюваної енергетики НАН України. 2021 рік. URL: <https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Vodneva-Strategia-Cover.pdf>.
2. Проєкт. Воднева стратегія України на період до 2050 року. URL: <https://www.mev.gov.ua/sites/default/files/field/file/vodneva-strategiya17.05.2024.pdf>.
3. Кузнецов М.П., Лисенко О.В., Хомутов С.В. Сезонне акумулювання енергії в гібридній енергосистемі. Відновлювана енергетика, 2024, №1. С. 6-21. URL: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).6-21](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).6-21).
4. Закон України «Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та “зеленої” трансформації енергетичної системи України» <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20#Text>.
5. Національний план дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/761-2024-%D1%80#Text>.
6. IEA. Global Hydrogen Review 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025>
7. 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. ISBN 978-966-999-034-2. URL: https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/atlas_2024_publication.pdf.

УДК 620.92, 662.769.2

БІЛИЙ ВОДЕНЬ, СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ

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 розвідувальних робіт з пошуку білого/природного водню, які ведуться в різних країнах, перспективи розвитку його використання у забезпеченні енергетичних потреб, приклади діючих об'єктів з використання природного водню.

Ключові слова: *Відновлювані джерела енергії, водень, білий/природний водень, серпентинізація, водневі технології, декарбонізація.*

WHITE HYDROGEN, STATUS AND PROSPECTS

M. Benmenni

*Institute of Renewable Energy Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
50 Metrolhichna str., Kyiv, Ukraine, 03140
phone: (044) 206-28-09, e-mail: mbenmenni@gmail.com*

The paper presents a brief overview of the state of exploration work to search for white/natural hydrogen, which is being conducted in different countries, the prospects for the development of its use in meeting energy needs, examples of operating facilities for the use of natural hydrogen.

Keywords: *Renewable energy sources, hydrogen, white/natural hydrogen, hydrogen technologies, serpentinization, decarbonization.*

ORCID: [0000-0001-6548-2205](https://orcid.org/0000-0001-6548-2205).

Вступ. Загрозлива кліматична ситуація змушує людство до енергетичного переходу, що передбачає комплекс дій, спрямованих на скорочення викидів вуглекислого газу і інвестування в низьковуглецеві джерела енергії.

100 років тому, так званий міський газ отримували від спалювання вугілля, згодом були знайдені великі запаси природного газу, який підвищив рівень забруднення навколишнього середовища парниковими газами. Це спонукало до пошуку більш екологічних джерел енергії. Існує висока вірогідність того, що така ж еволюція чекає на водень, як замітник природного газу.

На сьогоднішній день переважний обсяг споживаного водню виробляється з вуглеводнів, в основному з метану, зокрема, шляхом парового реформингу, який є дуже вуглецемістким. Однак існують і інші форми водню, у тому числі і екологічно чистий природний або білий водень (також зустрічають такі назви - самородний водень та геологічний водень), що утворюється в результаті таких геологічних процесів, як серпентинізація, коли вода взаємодіє з мінералами, багатими на залізо, під дією високих температур.

Відкриття перших родовищ білого водню. Перші природні джерела водню (H₂) були виявлені в морі в 1970-х роках, пізніше дослідження виявили наявність природного водню на землі і під землею і, хоча на сьогодні прямий видобуток залишається рідкісним, все більше і більше розглядається його використання для отримання справді чистого водню. В останні декілька років були відкриті джерела, що знаходяться в серцях континентів, особливо в найдавніших частинах. Мова іде, наприклад, про такі джерела в Малі, в Бразилії, в Австралії та в США.

На щорічній зустрічі Американської асоціації сприяння розвитку науки на початку 2024 року в Денвері (США), Geoffrey Ellis, керівник проєкту дослідження по природному водню, проведеного Геологічною службою США, заявив: «У підземних запасах по всьому світу може бути до 5 трильйонів тонн водню» і додав «хоча велика кількість цього водню, ймовірно, залишиться поза межами нашої досяжності, видобуток невеликої частки може задовольнити глобальний попит протягом сотень, якщо не тисяч років» [1].

Хіміки та науковці компанії HyTerra Ltd з Австралії виявили значні обсяги геологічного водню у газовій суміші із різними рівнями концентрації в різних країнах: в Туреччині із вмістом молекул H₂ 12%, в Ісландії - 24%, в Японії -

52%, в Омані - 82% та Сполучених Штатах - 96%, водень просочується із земної кори. У партнерстві із компанією Natural Hydrogen Energy LLC (США) поблизу міста Женева в Небрасці у 2023 році пробурили свердловину Hoarty NE3 глибиною 3400 м, в ній було виявлено підвищену концентрацію водню [2].

Дослідницька установа Rystad Energy з Норвегії випустила звіт, в якому стверджується, що якщо чотири роки тому лише 10 компаній займалися дослідженнями, то станом на березень 2024 року 40 компаній проводили пошуки родовищ природного водню. Зокрема, розвідувальні роботи проводилися в Австралії, США, Канаді, Колумбії, Іспанії, Франції, Альбанії та Південній Кореї [3].

Розвідувальні роботи та їх підтримка. У пошуках нових форм чистої енергії на заміну викопного палива все більше зростає інтерес до природного водню в багатьох країнах. Створюється спеціальні компанії/стартапи в США, Австралії та Іспанії зокрема, які запускають бурові роботи. Крім цього, відомо про перспективність білого водню в таких країнах як Канада, Японія, Китай, Оман та в інших, де вже перші дослідження доводять наявність білого водню. Наприклад, проведені аналіз гелогічних карт і хімічні вимірювання свідчать про присутність водню на території Швейцарії і в Альпійському регіоні загалом. За твердженнями співзасновника стартапу Lavoisier H2 Geosconsult, пана Eric Gaucher, були знайдені «породи, які виробляли водень у минулому» і уточнює «тепер нам потрібно з'ясувати, чи є в глибині породи, які все ще можуть виробляти водень» [4].

У кінці 2023 року команда французьких вчених заявила про потенційну наявність природного водню в надрах Лотарингії. Під час пошуку потенційних джерел метану в надрах коммуні Фольшвіллер випадково було виявлено родовище білого водню. Спеціалісти заявили: «Водень є у великих обсягах, а його концентрація зростає із глибиною так, що вона становить 20% на глибині 1250 метрів. Такі показники дозволяють нам прогнозувати, що, згідно із нашими моделями, на глибині 3000 м концентрація водню може перевищувати 90%». За наявними оцінками, родовище містить 46 мільйонів тонн природного водню [5].

А в кінці 2025 року дослідження даного родовища перешло на наступний етап розвитку і Група FDE (Française de l'Énergie) розпочала роботи з глибокого буріння свердловини PTH-2 у Понтп'єрі на 3000 м, щоб провести більш детальну оцінку в рамках програми REGALOR II, що проводиться у партнерстві з кількома науковими установами: Університетом Лотарингії, CNRS, BRGM та SOLEXPERS [6].

Слід уточнити, що у Франції перший офіційний дозвіл на проведення розвідки білого «самородного водню, гелію та споріднених речовин» у Департаменті Атлантичні Піренеї на території загальною площею близько 225 км² було видано в листопаді 2023 року компанії «TBH2 Aquitaine» строком п'ять років. Коментуючи дану подію засновник Vincent Bordmann заявив, що компанія має право розпочати дослідження, в тому числі сейсмічні, натомість роботи з буріння можуть бути виконанні лише після отримання подальших дозволів протягом 2-3 років [7]. «Ми не можемо залишити цей ресурс бездіяльним», так сказав президент Франції коли він у грудні 2023 року оголосив про бажання зробити Францію «країною-першопроходцем» і про значне фінансування для проведення досліджень потенціалу білого водню в рамках плану «Франція 2030» [8].

Доказом перспективності використання білого водню є інвестування у дослідження не лише від урядів, а і від приватного капіталу. Яскравим прикладом такого фінансування є стартап Koloma (США), який, станом на вересень 2024 року, зібрав 305 мільйонів доларів, у тому числі, за допомогою таких відомих людей як Білл Гейтс і Джефф Безос [9].

В Австралії, у травні 2024 року, стартап Gold Hydrogen опублікував результати нових розвідувальних робіт щодо потенціалу білого водню; вони заявили про відкриття на глибині 531 м водню з найбільшою на той момент концентрацією на рівні 95,8%. За даними стартапу, наявність водню було підтверджено тестуванням у семи зонах на глибинах від 250 до 1000 м. Хоча прогнозовані обсяги ще мають бути підтверджені, Gold Hydrogen вважає, що потенціал площадки може досягнути 1,3 мільйона тонн водню і до 96 мільярдів кубічних футів гелію [10].

Ще в далекому 1992 році було виявлено викиди газу на шахті в Албанії, проте лише після вибухів 2011, 2017 і 2023 років стало зрозуміло, що це було пов'язано із просочуванням білого водню. У результаті проведених досліджень було заявлено про родовище, яке може містити від 5000 до 50000 метричних тонн газу з чистотою 84%. Автори дослідження дійшли висновку, що, виходячи з наявного потоку, басейн викидає близько 11 метричних тонн на рік або близько 34 кг щоденно, за їх даними, якщо видобуток шахти об'єднати з іншими потоками шахти, то можна буде отримувати близько 200 метричних тонн в рік [11].

Діючий об'єкт природного водню. Станом на сьогодні, відомо лише про одне родовище природного водню в Малі, яке вже експлуатується декілька років, причому, без будь-якого падіння тиску та без будь-яких поверхневих витоків. Після багаторічних випробувань і експериментальної фази, у 2012 році компанія Hydroma Inc. запустила перший об'єкт використання природного водню для виробництва електроенергії в маленькому селі в Малі. Під час проведення робіт з пошуку джерела води ще в далекому 1987 році сталася загорання газу, що вивільнився і тоді вири-

шили закрити свердловину. Через 20 років повернулися для пошуку джерела енергії і цього разу спеціалісти підвели просочування природного водню. Таким чином було відкрито родовище білого водню із рівнем чистоти 98% і почалось виробництво електроенергії, що безкоштовно постачається місцевим мешканцям. Слід зазначити, що, за наявною оцінкою, вартість кг водню, який добувається з даної свердловини є дуже низькою і складає близько 0,50 доларів США [12].

Висновки. Багато країн і компаній інвестують у дослідження та розвідувальні роботи у пошуках родовищ білого водню для його використання у якості джерела енергії для заміни бензину чи дизеля або для виробництва електроенергії тощо. Природний водень є економічно ефективною, довговічною, екологічно чистою альтернативою блакитному та сірому водню і розглядається як ключовий компонент стратегії зменшення викидів парникових газів в боротьбі зі зміною клімату. Однак на шляху до його масштабної експлуатації існує багато проблем, вирішення яких вимагатиме багатогранних зусиль, що потребуватимуть інноваційних методів дослідження для розкриття потенціалу такого стійкого і чистого джерела енергії, яке може забезпечити енергетичні потреби на тривалий час.

ПОСИЛАННЯ

1. Gold Hydrogen – Set to Satisfy Global Energy Thirst for Centuries. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/gold-hydrogen-global-energy/8563100/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=gaj7bxq450DIsU (дата звернення: 6.03.2026);
2. Un puits d'hydrogène naturel bientôt testé aux Etats-Unis. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.h2-mobile.fr/actus/hyterra-puits-hydrogene-naturel-bientot-teste-etats-unis/> (дата звернення: 18.03.2026);
3. Hydrogène blanc : une nouvelle ruée vers l'or ! [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.h2-mobile.fr/actus/hydrogene-blanc-nouvelle-ruée-or/> (дата звернення: 10.03.2026);
4. Switzerland jumps on board the natural hydrogen search bandwagon [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/natural-hydrogen-switzerland/8561472/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=it33NHADJ85DIsU (дата звернення: 11.03.2026);
5. Hydrogène naturel : et si la France détenait le plus gros gisement au monde? [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.h2-mobile.fr/actus/hydrogene-naturel-france-detenait-plus-gros-gisement-monde/> (дата звернення: 18.03.2026);
6. En Moselle, l'exploration d'hydrogène naturel entre dans une nouvelle dimension [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.h2-mobile.fr/actus/moselle-puits-exploration-hydrogene-naturel-projet-regalor-2/> (дата звернення: 18.03.2026);
7. Hydrogène blanc : feu vert pour la première exploration en France [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.h2-mobile.fr/actus/hydrogene-blanc-feu-vert-premiere-exploration-france/> (дата звернення: 10.03.2026);
8. Energie : Emmanuel Macron mise sur l'hydrogène naturel [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.h2-mobile.fr/actus/energie-emmanuel-macron-mise-hydrogene-naturel/> (дата звернення: 11.03.2026);
9. Gates and Bezos backed company throws weight behind white hydrogen [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/gates-and-bezos-white-hydrogen/8567131/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=gc9F.TmcQe5DIsU (дата звернення: 5.03.2026);
10. Hydrogène naturel : en Australie, ce site affiche une concentration exceptionnelle [Електронний ресурс] // – Режим доступу: <https://www.h2-mobile.fr/actus/hydrogene-naturel-australie-site-concentration-exceptionnelle/> (дата звернення: 10.03.2026);
11. Will Albania's huge white hydrogen deposit change the clean energy game? [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/white-hydrogen-albania-mine/8563494/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=g_SSu1uzyO5DIsU (дата звернення: 18.03.2026);
12. The Hunt for Vast Underground White Hydrogen Reserves [Електронний ресурс] // – Режим доступу: https://www.hydrogenfuelnews.com/the-hunt-for-white-hydrogen/8560445/?awt_a=1jpsU&awt_l=Co7SC&awt_m=hb99w2FdJ85DIsU (дата звернення: 18.03.2026);

КОНЦЕПЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ХАБУ «КОБЛЕВЕ» ЯК МОДЕЛІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ТА ВОДНЕВОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ ПРИЧОРНОМОРЬСЬКОГО РЕГІОНУ УКРАЇНИ З УРАХУВАННЯМ ДАНСЬКОГО ДОСВІДУ

Ю. В. Маслов¹, В. П. Киливник², Ю. Л. Борзунов³, О. В. Зур'ян⁴

¹ Коблівська територіальна громада, Україна

² Коблівська територіальна громада; ГО «Майбутня платформа сталого розвитку», Україна

³ ТОВ «Продукт сонячного світла», Україна

⁴ Інститут відновлюваної енергетики НАН України

Запропоновано концепцію енергетичного хабу Коблівської територіальної громади як масштабованої моделі розвитку децентралізованої відновлюваної енергетики та довгострокової водневої трансформації причорноморського регіону. Модель розглядає інтеграцію вітрової та сонячної генерації, систем накопичення енергії (BESS) та алгоритмічного управління енергетичними потоками з урахуванням мережевих обмежень і потреб критичної інфраструктури. Показано, що поєднання відновлюваної генерації, систем накопичення та інституційної моделі енергетичного кооперативу створює передумови для формування регіонального енергетичного кластеру та інтеграції у перспективну Чорноморську водневу долину.

Ключові слова: енергетичний хаб, децентралізована генерація, відновлювана енергетика, BESS, зелений водень, енергетичний кооператив, воднева економіка.

THE CONCEPT OF THE KOBLEVE ENERGY HUB AS A MODEL FOR DECENTRALIZED POWER GENERATION AND HYDROGEN TRANSFORMATION IN UKRAINE'S BLACK SEA REGION, BASED ON DANISH EXPERIENCE

Y. V. Maslov¹, V. P. Kylyvnyk², Y. L. Borzunov³, O. V. Zurian⁴

¹ Kobleve Territorial Community, Ukraine

² Kobleve Territorial Community; NGO "Future Platform for Sustainable Development", Ukraine

³ LLC "Solar Light Product", Ukraine

⁴ Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine

The Kobleve territorial community energy hub is proposed as a scalable model for the development of decentralized renewable energy and the long-term hydrogen transformation of the Black Sea region. The model considers the integration of wind and solar generation, battery energy storage systems (BESS), and algorithm-based energy management taking into account grid constraints and the needs of critical infrastructure. It is shown that the integration of renewable generation, energy storage systems and an institutional model of a community energy cooperative creates conditions for the formation of a regional energy cluster and its integration into the future Black Sea hydrogen valley.

Key words: energy hub, decentralized generation, renewable energy, battery energy storage system, green hydrogen, energy cooperative, hydrogen economy.

ORCID: ¹0009-0009-3060-2575; ³0009-0006-0583-644X; ⁴0000-0002-2391-1611;

В умовах зростання викликів енергетичної безпеки, необхідності декарбонізації економіки та інтеграції відновлюваних джерел енергії актуальним стає пошук моделей розвитку децентралізованих енергетичних систем на рівні територіальних громад з метою реалізації Глобальної цілі ООН №7: Доступна та чиста енергія. Сучасні тенденції розвитку енергетики свідчать про необхідність переходу від централізованих моделей енергопостачання до інтегрованих енергетичних систем, що поєднують локальну генерацію, системи накопичення енергії та перспективні технології виробництва водню. У цьому контексті формування енергетичних хабів розглядається як один із інструментів підвищення стійкості енергосистеми, розвитку нових індустрій та інтеграції регіонів у глобальні енергетичні ринки.

Предметом дослідження є концептуальна модель енергетичного хабу «Коблеве», що розглядається як масштабована система розвитку децентралізованої генерації та подальшої інтеграції водневих технологій. Коблівська територіальна громада Миколаївської області розташована у Причорноморському регіоні України, який характеризується значним потенціалом розвитку відновлюваної енергетики. За результатами експертних оцінок Інституту відновлюваної енергетики НАН України, сумарний потенціал встановленої потужності вітроенергетичних установок на території громади може становити близько 1586 МВт, що створює передумови для формування значного обсягу генерації електроенергії. Водночас аналіз придатних територій для розміщення сонячних електростанцій показує, що близько 21 % площі громади можуть бути використані для встановлення фотоелектричних модулів, теоретичною потужністю 7686,7 МВт, що доповнює вітрову генерацію та формує збалансований енергетичний потенціал території.

Концепція енергетичного хабу передбачає створення інтегрованої системи генерації та управління енергетичними потоками, що поєднує вітрову генерацію, сонячну генерацію та системи накопичення енергії. Базова архітектура системи ґрунтується на принципі взаємодії BEC–CEC–BESS, що дозволяє забезпечити балансування виробництва та споживання електроенергії, зменшити навантаження на зовнішні мережі та підвищити енергетичну автономність громади. Такий підхід створює основу для формування стійкої енергетичної системи, здатної адаптуватися до змінних режимів генерації відновлюваних джерел енергії.

Окремою складовою концепції є застосування алгоритмічного підходу до управління енергетичною системою громади. Такий підхід передбачає використання моделей оптимізації режимів генерації, накопичення та споживання електроенергії з урахуванням мережевих обмежень, профілів навантаження та пріоритетів забезпечення критичної інфраструктури. Важливою складовою моделі є інституційна структура розвитку енергетичної системи громади. У межах концепції передбачається створення енергетичного кооперативу, що дозволяє залучити до реалізації проєкту органи місцевого самоврядування, комунальні підприємства, бізнес та жителів громади. Такий підхід сприяє формуванню локальної економічної цінності, підвищенню інвестиційної привабливості території та створенню умов для розвитку індустріального кластеру на основі відновлюваної енергетики.

Важливим елементом концепції є адаптація міжнародного досвіду розвитку децентралізованої енергетики, зокрема данських моделей енергетичних кооперативів та енергетичних островів. Під час розробки концептуальної моделі енергетичного хабу «Коблеве» використано підходи, апробовані у проєктах Middelgrunden (Копенгаген) та Samso Energy Academy (Данія), не як готове рішення, а як основу для формування локально адаптованої моделі з урахуванням українських технічних, мережевих, регуляторних та безпекових умов. Такий підхід дозволяє поєднати принципи демократичної енергетики, локальної участі громади та довгострокового стратегічного планування з потребами підвищення енергетичної стійкості території. Одним із елементів науково-прикладної новизни роботи є запропонований підхід до імплементації та адаптації данського досвіду створення Copenhagen Energy Islands до умов прибережної громади Причорноморського регіону України.

Подальший розвиток енергетичного хабу пов'язується з інтеграцією енергетичної інфраструктури громади з регіональними промисловими та портовими об'єктами Причорноморського регіону. У цьому контексті розглядається можливість використання надлишкової відновлюваної генерації для виробництва зеленого водню з подальшим використанням його у хімічній промисловості, транспортній інфраструктурі та енергетичних системах. Зокрема, перспективним напрямом є інтеграція енергетичного хабу з промисловими підприємствами регіону, що дозволяє розглядати водень як елемент декарбонізації існуючих виробничих процесів та формування нових енергетичних продуктів, зокрема зеленого аміаку.

У довгостроковій перспективі розвиток енергетичного хабу «Коблеве» може розглядатися як один із елементів формування Чорноморської водневої долини, що передбачає створення інтегрованої регіональної системи виробництва, зберігання та експорту зеленого водню. Така система може включати офшорну вітрову генерацію, виробництво водню на основі електролізу, портову інфраструктуру для транспортування енергоресурсів та інтеграцію з європейською водневою мережею. Реалізація подібної моделі створює передумови для формування нової енергетичної ролі Причорноморського регіону України та його інтеграції до європейського ринку чистої енергії.

Висновок:

У роботі запропоновано концептуальну модель енергетичного хабу «Коблеве» як масштабовану модель розвитку децентралізованої відновлюваної енергетики територіальної громади. Показано, що поєднання вітрової та масштабної сонячної генерації, систем накопичення енергії та кооперативної моделі управління створює передумови для формування стійкої енергетичної інфраструктури. Запропонована архітектура енергетичного хабу забезпечує можливість поетапного переходу від локальної генерації до впровадження технологій виробництва зеленого водню та формування регіонального енергетичного кластеру. Окрему науково-прикладну цінність становить адаптація данського досвіду енергетичних кооперативів та енергетичних островів до умов Коблівської територіальної громади. Отримані результати свідчать про перспективність використання моделі енергетичних хабів як інструменту енергетичної трансформації територіальних громад України та їх інтеграції до майбутньої європейської водневої економіки.

ПОСИЛАННЯ

1. Резолюція Генеральної Асамблеї ООН № 70/1 від 25 вересня 2015 року «Перетворення нашого світу: Порядок денний у сфері сталого розвитку до 2030 року».
2. Указ Президента України від 30 вересня 2019 р. № 722 «Про Цілі сталого розвитку України на період до 2030 року».
3. Рамкова угода між Урядом України та Урядом Королівства Данія щодо загальних умов та процедур, організаційних заходів та фінансових умов реалізації програми Danida Business Finance в Україні. 14.03.2019.
4. 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».
5. IEA. The Future of Hydrogen: Seizing Today's Opportunities. International Energy Agency, Paris, 2019.
6. European Commission. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe. Brussels, 2020.
7. Мхітарян Н. М., Кудря С. О., Зур'ян О. В. Концепція створення інтерактивної карти інвестиційної привабливості зеленого водню в Україні. Відновлювана енергетика. 2025. №2. С. 151–161. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2\(81\).151-161](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.2(81).151-161)
8. Кудря С. О., Зур'ян О. В. Принципи формування шару інвестиційної привабливості у ГИС-карті проєктів зеленої водневої енергетики. Відновлювана енергетика. 2025. №3. С. 145–154. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3\(82\).145-154](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.3(82).145-154)
9. Matiakh S., Ausheva N., Kardashov O., Bondarenko D. Determination of the photovoltaic potential of territorial communities of Ukraine using geoinformation systems. Відновлювана енергетика. 2025. №4 (83) . С. 165-188. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4\(83\).165-188](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4(83).165-188)
10. Зур'ян О. В., Толкунов А. С., Омельченко Т. В. Врахування ризику при дослідженні інвестиційної привабливості об'єктів геотермальної енергетики. Вісник КНУ ім. Т. Шевченка. Геологія. 2025. №2 (109). С. 97–103. <https://doi.org/10.17721/1728-2713.109.13>
11. Четверик Г. О. та ін. Потенціал біоводню з агровідходів у територіальних громадах. Відновлювана енергетика. 2025. №4. С. 312-329. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4\(83\).312-329](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4(83).312-329)
12. Маслов Ю. В. Системи керування електроприводами з елементами нечіткої логіки та штучного інтелекту. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2025. №1 (5), С. 218–230. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.5.1.23>
13. Маслов Ю. В. Техніко-економічне моделювання виробництва «зеленого» аміаку на основі електролізного водню: оцінка ефективності ретрофіту заводів у дії. Науковий вісник Таврійського державного агротехнологічного університету. 2025. №15 (2). С. 197–204. <https://doi.org/10.32782/2220-8674-2025-15-2-23>
14. Маслов Ю. В., Борзунов Ю. Л. Автоматизація процесів у транспортних електромеханічних системах на базі IoT-технологій. Інформаційні технології та суспільство. 2025. №4 (19). С. 106–112. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2025.4.18>
15. Імплементация 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. XXVI Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» Україна. 2025. С. 105–152. <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025>
16. Локальна мережа відновленої енергогенерації на основі кооперативу – цифрової платформи на базі Коблівської Т.Г. XXV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» Україна. 2024.
17. Від піонера в галузі вітроенергетики до створення децентралізованої енергетики, як пілотного проєкту водневої стратегії України на прикладі Коблівської Т.Г. XXIV Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» Україна. 2023.
18. Презентація інвестиційного проєкту коблівської вітряної електростанції в селі тузли Коблівської Т.Г. Миколаївської області України. XXIII Міжнародна науково-практична конференція «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті» Україна. 2022.

ESG У ВОДНЕВІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ: ПЕРСПЕКТИВИ ЧИ УТОПІЯ?

М. Р. Лопушанська^{1,2,3}, Н. В. Ревуцька², Л. В. Циганок³, К. В. Яцишина⁴

¹Товариство з обмеженою відповідальністю «ЕКО-ОПТИМА»,
82000, Старосамбірський р-н, Львівська обл., місто Старий Самбір, вулиця Лева Галицького, будинок, 96а
mariialopushanska@gmail.com

²ГО «Жіночий енергетичний клуб України» (WECU), 02000, м. Київ, вул. Воздвиженська, 14, корп.
nataliia.revutska.wecu@gmail.com

³Асоціація професіоналів довкілля «PAEW», 03087, Київ-87 а/с 25
liudmyla.paeu@gmail.com

⁴Німецьке товариство міжнародного співробітництва (GIZ) Гмбх, проєкт: «H2-diplo – Дипломатія Декарбонізації», 01024, м. Київ, вул. Антоновича, 16Б,
klavdiia.yatsyshyna@giz.de

Мета дослідження полягає в аналізі можливостей інтеграції принципів ESG у розвиток водневої енергетики та визначенні ключових екологічних, соціальних і управлінських ризиків таких проєктів у контексті сучасного енергетичного переходу. У роботі використано методи теоретичного аналізу наукових джерел, порівняльного аналізу ESG-підходів у енергетичних проєктах, а також аналізу екологічних та соціальних ризиків розвитку водневої енергетики.

Ключові слова: ESG, воднева енергетика, зелені технології, водокористування, енергетичний перехід, сталий розвиток.

ESG IN HYDROGEN ENERGY: PROSPECTS OR UTOPIA?

M. R. Lopushanska^{1,2,3}, N. V. Revutska², L. V. Tsyganok³, K. V. Yatsyshyna⁴

¹ECO-OPTIMA Limited Liability Company,
96a, Lev Halytsky Street, Saryi Sambir, Lviv region, 82000, Saryi Sambir district, Lviv region
e-mail: mariialopushanska@gmail.com

²NGO 'Women's Energy Club of Ukraine' (WECU) 02000, Kyiv, 14 Vozdvyzhenska str.
nataliia.revutska.wecu@gmail.com

³Professional Association Of Environmentalists Of The World (PAEW), 03087, Kyiv-87, PO Box 25
liudmyla.paeu@gmail.com

⁴Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, Project: "H2-diplo – Decarbonization Diplomacy", 01024, Kyiv, 16B, Antonovycha Str., klavdiia.yatsyshyna@giz.de

The purpose of the study is to analyse the possibilities of integrating ESG principles into the development of hydrogen energy and to identify the key environmental, social and governance risks of such projects in the context of the current energy transition. The study uses methods of theoretical analysis of scientific sources, comparative analysis of ESG approaches in energy projects, as well as analysis of environmental and social risks of hydrogen energy development.

Key words: ESG, hydrogen energy, green technologies, water use, energy transition, sustainable development.

ORCID: ¹0000-0002-0557-1609.

У глобальному енергетичному переході воднева енергетика розглядається як один із ключових інструментів декарбонізації секторів, складних для електрифікації, зокрема важкої промисловості, транспорту та хімічного виробництва. Виробництво зеленого водню на основі відновлюваних джерел енергії дедалі активніше інтегрується в енергетичні стратегії провідних економік світу та політики Європейського Союзу щодо досягнення кліматичної нейтральності. Паралельно з технологічним розвитком формується потреба у нових підходах до оцінки екологічних, соціальних та управлінських аспектів енергетичних проєктів. У цьому контексті важливим інструментом оцінки сталості інвестицій та мінімізації довгострокових ризиків енергетичної трансформації є концепція ESG (Environmental, Social, Governance) як інструмент управління ключовими ризиками проєкту на основі поєднання екологічних, соціальних

та управлінських факторів у компанії. Питання інтеграції принципів ESG в діяльність українських підприємств все частіше обговорюються в Україні. [1, 2].

Питання застосування ESG-підходів до водневої енергетики потребує критичного осмислення, особливо у країнах, де відповідний сектор перебуває на ранній стадії формування. Попри значний потенціал виробництва зеленого водню на основі відновлюваних джерел енергії, воднева енергетика в Україні поки що не сформувалася як повноцінний ринковий сектор і представлена переважно стратегічними документами, дослідницькими ініціативами та пілотними проектами. Водночас Україна розглядається як перспективний партнер Європейського Союзу у формуванні майбутнього водневого ринку, що зумовлює необхідність врахування принципів сталості вже на етапі формування політик і проектних рішень.

ESG (Environmental, Social, Governance) – це інструмент управління ключовими ризиками проекту. Все частіше в Україні обговорюються питання інтеграції принципів ESG в діяльність українських підприємств [1]. ESG – це поєднання екологічних, соціальних та управлінських факторів у компанії [2]. І для кожного підприємства важливість цих факторів буде різною. Для прикладу, якщо підприємство споживає багато води, при цьому не здійснюючи викиди в атмосферу, то саме найбільший аспект буде зосереджено не водокористуванні.

У цьому контексті особливої актуальності набуває аналіз можливостей інтеграції принципів ESG у формування нових енергетичних напрямів, зокрема водневої енергетики. Розглянемо детальніше застосування ESG-підходів на прикладі зеленої водневої енергетики.

Розглянемо детальніше інтеграцію принципів ESG на прикладі зеленої водневої енергетики. В Україні все активніше обговорюється розвиток водневої енергетики, який розглядається як один із ключових елементів декарбонізації енергетичного сектору та переходу до кліматично нейтральної економіки. Оскільки, цей напрям новий для нас, то виникає чимало питань, які варто одразу розглядати крізь призму інтеграції принципів ESG. Адже саме через ESG можна оцінити ключові ризики в таких проектах.

E (Environmental) – це про викиди в атмосферу, вплив на біорізноманіття, управління відходами, обсяги споживання енергії та води тощо [3]. З екологічної точки зору розвиток водневої енергетики супроводжується низкою викликів. Попри потенціал скорочення викидів парникових газів, виробництво водню шляхом електролізу потребує значних обсягів води та електроенергії, що може посилювати навантаження на довкілля, особливо в регіонах із обмеженими водними ресурсами. Екологічний компонент ESG у водневих проектах повинен включати комплексну оцінку життєвого циклу технологій, водного сліду, енергетичної ефективності та впливу на екосистеми.

У випадку розвитку зеленої водневої енергетики одним із ключових екологічних викликів є значні обсяги води, необхідні для процесу електролізу. Це особливо актуально для регіонів із дефіцитом водних ресурсів. Таким чином, питання сталого водокористування та оцінки водного сліду водневих проектів стає одним із критичних аспектів ESG-оцінки.

S (Social) компонент – це про гідність праці та рівність, охорону здоров'я та безпеку, права людей та людиноцентричність бізнесу, відповідальні ланцюги постачання, а також участь у житті спільнот [4]. S-ризики, які можуть виникати у компаніях, це страйки працівників, дискримінація, нещасні випадки та травми, порушення прав підрядників, соціальне незадоволення громади, а також скандали у ЗМІ. Їх вплив може значно підірвати репутацію компанії та стати негативним сигналом під час співпраці з кредиторами [4]. Для водневих проектів соціальний компонент також пов'язаний із прийняттям нових енергетичних технологій місцевими громадами, питаннями зайнятості, безпеки виробництва та формування нових компетенцій на ринку праці.

Соціальний вимір ESG у водневій енергетиці пов'язаний із забезпеченням справедливого енергетичного переходу, залученням місцевих громад, створенням нових робочих місць та розвитком людського капіталу, що набуває особливої ваги в умовах післявоєнного відновлення України.

У межах соціального компоненту ESG окремої уваги набуває гендерний аспект розвитку водневої енергетики. Формування нових енергетичних секторів відкриває можливості для більш збалансованого залучення жінок до технічних та управлінських професій, а також забезпечення можливостей навчання та перекваліфікації працівників із традиційних галузей енергетики. Значну роль у формуванні такого підходу відіграють платформи міжсекторального діалогу: зокрема, у серпні 2025 року ГО «Жіночий енергетичний клуб України» спільно з проектом H₂-diplo провели круглий стіл щодо перспектив розвитку водневої економіки в Україні, під час якого було обговорено потенціал зеленого водню у процесах декарбонізації енергетики, а також гендерний вимір енергетичного переходу, зокрема питання залучення жінок, розвитку навичок і перекваліфікації кадрів для нових секторів енергетики.

Забезпечення рівного доступу до професійного розвитку, участі у прийнятті рішень та формування інклюзивного середовища є важливою складовою сталого розвитку енергетичного сектору.

G (Governance) – це прозорість, доброчесність та системність у веденні бізнесу. До головних ризиків цього фактору доцільно віднести недосконалість відсутність антикорупційної політики, відсутність ESG-індикаторів у KPI менеджменту, етичні порушення тощо [3], що набуває особливого значення для інвесторів водневих проектів. особливого

значення набуває прозора система корпоративного управління, наявність ESG-індикаторів, а також інтеграція ESG-ризиків у систему управління компанією.

Аналіз водневих проєктів, що зараз розробляються в Україні, демонструє різні підходи до інтеграції принципів ESG уже на етапах концепції, передпроектних досліджень та техніко-економічних обґрунтувань. З точки зору **Е-компонента**, проєкти декларують орієнтацію на виробництво зеленого водню на основі відновлюваних джерел енергії та мінімізацію вуглецевого сліду. До прикладу, кластер GreenWest PtX на заході України позиціонується як джерело 100% зеленого водню та його похідних для українського та європейського ринків із фокусом на декарбонізацію складних секторів економіки. Zakarpattia Hydrogen Valley передбачає інтеграцію сонячної та вітрової генерації з виробництвом водню та його транспортуванням до металургійного підприємства у Словаччині, що створює додаткові вимоги до оцінки впливу на довкілля та водокористування в екологічно вразливому регіоні. Ініціатива H2EU+Store [5] розглядає захід України як базу для масштабного виробництва зеленого водню та його зберігання в підземних сховищах у Центральній Європі, що вимагає комплексної оцінки життєвого циклу і транскордонних екологічних ризиків. Частина проєктів передбачає подальше виробництво зелених похідних (аміаку, метанолу, добрив) із фокусом на відповідність європейським кліматичним та екологічним вимогам, включно зі стандартами СВАМ, що розглядається як передумова доступу до майбутніх експортних ринків.

С-компонент проявляється через акцент на розвитку регіональної інфраструктури та створенні доданої вартості в постраждалих від війни регіонах. Так, Транспортний хаб в Одеській області передбачає інтеграцію з хімічною промисловістю та портовою інфраструктурою, виробництво зеленого аміаку для морського бункерування, що потенційно створить мультиплікаційний ефект для регіональної економіки. Публічні дискусії навколо проєктів у Закарпатті демонструють також важливість врахування думки місцевих громад, зокрема, щодо збереження унікальних природних територій та вже вичерпаного екологічного потенціалу регіону, що є ключовим аспектом «S» у контексті соціальної прийнятності та справедливого переходу. Окремі ініціативи передбачають тісну співпрацю з університетами та науковими установами, що сприяє розвитку людського капіталу та інноваційного потенціалу. До прикладу, у 2025 році в КПІ ім. Ігоря Сікорського запроваджено нову бакалаврську освітню програму, орієнтовану на біопаливні та водневі технології, що має на меті підготовку фахівців для подальшого розвитку водневої енергетики в Україні [6].

Г-аспект відображається у структурі партнерств та джерелах фінансування. Враховуючи капіталомісткий характер водневих проєктів, більша частина з них реалізується у співпраці з європейськими партнерами, фінансовими інституціями та донорами, що зумовлює застосування практик прозорого управління, належної перевірки (due diligence), антикорупційних процедур та вимог до нефінансової звітності. У той же час, транскордонний характер таких ініціатив, як H2EU+Store, вимагає гармонізації стандартів управління ризиками з регуляторними вимогами ЄС, зокрема в частині безпеки критичної інфраструктури, доступу до мереж та наявності offtake контрактів на поставку зеленого водню.

Водночас більшість українських водневих проєктів наразі перебуває на ранніх стадіях розвитку, що обмежує можливість повноцінної оцінки фактичних ESG-показників. Тому виникає важливе теоретичне питання: наскільки доречно говорити про ESG у водневій енергетиці України за умов, коли сам сектор перебуває лише на стадії становлення? На перший погляд, застосування ESG-підходів може виглядати передчасним, адже відсутність масштабних комерційних проєктів ускладнює емпіричну оцінку реальних екологічних і соціальних ефектів водневих технологій.

Однак саме ця обставина відкриває нові аналітичні можливості. У випадку нових енергетичних технологій ESG може виступати не лише інструментом оцінки вже реалізованих проєктів, але й стратегічним підходом до випереджального управління ризиками. Іншими словами, йдеться не про аналіз наявної практики, а про формування принципів проєктування майбутнього сектору. Такий підхід дозволяє інтегрувати екологічні, соціальні та управлінські критерії на ранніх етапах розвитку технологій, запобігаючи виникненню структурних проблем, які історично супроводжували розвиток традиційної енергетики.

Таким чином, у контексті України ESG-підходи до водневої енергетики доцільно розглядати передусім як інструмент превентивного стратегічного планування, що дозволяє оцінити потенційні ризики майбутніх водневих проєктів та сформулювати більш стійку модель розвитку галузі. Такий підхід відповідає логіці сталого розвитку та принципам справедливого енергетичного переходу, що дедалі активніше інтегруються у політики енергетичної трансформації.

Отже, інтеграція принципів ESG у розвиток водневої енергетики є необхідною умовою сталого впровадження цієї технології. Аналіз екологічних, соціальних та управлінських аспектів дозволяє своєчасно ідентифікувати ризики таких проєктів, зокрема пов'язані з водокористуванням, соціальним сприйняттям технології та прозорістю управління. Використання ESG-підходу може стати важливим інструментом підвищення інвестиційної привабливості водневих проєктів та їх відповідності міжнародним стандартам сталого розвитку.

ПОСИЛАННЯ

1. Лопушанська М. ESG у вітроенергетиці України: прикладний інструмент управління ризиками в умовах війни. Вітроенергетичний сектор України 2025. URL: <https://uwea.com.ua/ua/news/entry/uvea-vipustila-oglyad-vtroenergetichnogo-sektoru-ukrani-za-2025-rk/> (дата звернення: 07.03.2026).
2. ЩО TAKE ESG-ДАНИ та як вони показують, чи дадуть вам гроші: приклад. URL: <https://ukraine-oss.com/shho-take-esg-dani-ta-yak-vony-pokazuuyut-chy-dadut-vam-groshi-pryklad/> (дата звернення 07.03.2026).
3. Що таке ESG-метрики і як з ними працювати. URL: <https://ukraine-oss.com/shho-take-esg-metryky-i-yak-z-nymy-praczuuvaty/> (дата звернення: 07.03.2026).
4. Готуємось до ESRS S1 в умовах війни: що треба знати про S-стандарти. URL:
5. <https://ukraine-oss.com/gotuyemos-do-esrs-s1-v-umovah-vijny-shho-treba-znaty-pro-s-standarty/> (дата звернення: 04.03.2026).
6. Захід України має значний потенціал для виробництва зеленого водню – H2EU+Store. URL: https://expro.com.ua/novini/zahd-ukrani-ma-znachniy-potencal-dlya-virobnictva-zelenogo-vodnyu--h2eustore?fbclid=iwy2xjawpn5i5lehua2flbqixmqbzcnrjbmfwcf9pzbaymjiwmzkxng4mjawodkyaaeeb9xzsafan9xwr-mdwx0mvt7z0yde9upgnkqwfahglei5fly9ojp-2w58o1y_aem_azdvmxjnq8fc5ictccgroa (дата звернення: 13.03.2026).
7. Опис освітньо-професійної програми «Енергоощадне обладнання біопаливних та водневих технологій» (бакалаврський рівень). URL: https://osvita.kpi.ua/sites/default/files/oop/gg88_oppb_eoobpvt_2025.pdf (дата звернення: 13.03.2026).

УДК 621.6

АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ АДАПТАЦІЇ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ ДО 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

Проаналізовано технічний стан газотранспортної системи України та оцінено можливості адаптації до транспортування водню. Розглянуто фізико-механічний вплив водню на матеріали трубопроводів. Визначено ключові технічні обмеження та потенційні напрямки модернізації.

Ключові слова: газотранспортна система, водень, транспортування водню, воднева крихкість.

ANALYSIS OF THE POSSIBILITIES OF ADAPTING THE UKRAINIAN GAS TRANSPORTATION SYSTEM TO HYDROGEN TRANSPORTATION

O. O. Mishin

NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
37 Beresteisky Ave., Kyiv, 03056, Ukraine
tel.: (093) 431-93-26, e-mail: oleksandirmisin@gmail.com

The technical condition of Ukraine's gas transportation system has been analysed and the possibilities for adapting it to hydrogen transportation have been assessed. The physical and mechanical impact of hydrogen on pipeline materials is considered. Key technical limitations and potential areas for modernisation are identified.

Keywords: gas transmission system, hydrogen, hydrogen transportation, hydrogen embrittlement.

ORCID: 0009-0005-6585-1409.

Декарбонізація енергетичного сектору є пріоритетом світової кліматичної політики, а водень розглядається як універсальний енергоносіє, здатний забезпечити декарбонізацію промисловості, енергетики та транспорту [1]. Особливий потенціал має «зелений» водень, отриманий з відновлюваних джерел енергії, але його властивості – низька об'ємна енергощільність та висока дифузійна здатність, потребують специфічних технологічних рішень для транспортування [2].

Формування водневої економіки потребує створення розвиненої транспортної інфраструктури, і адаптація існуючих газотранспортних систем є пріоритетнішою за будівництво нових [1]. Україна володіє однією з найбільших у Європі магістральних ГТС, що створює потенціал для інтеграції у водневу інфраструктуру [3]. Однак, воднево-індуковане розтріскування металів, підвищена проникність та зміна гідрравлічних режимів транспортування формують технічні обмеження для використання існуючих трубопроводів без їх попередньої модернізації [4].

Газотранспортна система України є однією з найбільших у Європі і була спроектована для транспортування значних обсягів природного газу за магістральних умов експлуатації [3]. Загальна протяжність магістральних газопроводів становить близько 37-38 тис. км; трубопроводи мають діаметри від 720 до 1420 мм, що забезпечує транспортування великих потоків на великі відстані [3].

Проектна пропускна здатність системи на вході близько 290 млрд м³ природного газу на рік. Підтримання необхідних режимів тиску та витрати забезпечується мережею з понад 70 компресорних станцій, оснащених газоперекачувальними агрегатами різної потужності. Робочий тиск у магістральних трубопроводах залежно від ділянки, становить 5,4-7,5 МПа. Система інтегрована з мережею підземних сховищ газу (ПСГ) – 12-13 об'єктів із сукупним об'ємом близько 31 млрд м³, що забезпечує гнучке регулювання сезонних та пікових навантажень [3].

Магістральні трубопроводи виготовлені переважно з вуглецевих і низьколегованих сталей класів міцності K52-K60 (еквівалент API 5L, X52-X60, марки 17Г1С, 17Г1С-У), які проектувалися для транспортування природного газу в умовах відповідних механічних навантажень, температурних режимів та циклічного знакозмінного тиску. Значна частина трубопроводів перебуває в експлуатації понад 30-40 років, що зумовлює необхідність урахування ефектів старіння металу, накопичення втомної пошкодженості та деградації зварних з'єднань [4][5].

Основним і найбільш критичним технічним обмеженням є схильність трубопровідних сталей до воднево-індукованого розтріскування. Атомарний водень, проникаючи у кристалічну ґратку металу шляхом дифузії, знижує його пластичність та тріщиностійкість, що створює передумови для крихкого руйнування під навантаженням. Дослідження після 38 років експлуатації газопроводу, виготовленого зі сталі 17Г1С (API 5L X52) із застосуванням методу J-інтеграла нелінійної механіки руйнування, показали, що після електрохімічного насичення воднем значення $J_{0.2}$ (показник тріщиностійкості матеріалу) знижується більш, ніж утричі, порівняно з незарядженими зразками [3]. Принципово важливо, що стандартні характеристики: межа міцності та межа текучості – практично не відрізнялися між трубопровідною та резервними сталлями, тоді як метод J-інтеграла виявив суттєву деградацію тріщиностійкості [3]. Це свідчить про недостатність стандартних методів оцінки стану металу для прогнозування поведінки трубопроводів під час транспортування водню. Додатковим чинником є деформаційне старіння, індуковане воднем: внутрішні напруження від дифузного водню спричиняють локальну пластичну деформацію металу без зовнішнього навантаження, що підвищує крихкість навіть низьколегованих сталей при тривалій експлуатації [4].

Нижча об'ємна теплота згорання водню (~10,8 МДж/м³) проти (~35,8 МДж/м³) для природного газу вимагає збільшення об'ємної витрати приблизно в 3,3 рази для забезпечення еквівалентної теплової потужності, що змінює гідрравлічний режим та збільшує гідрравлічні втрати [2]. Менший розмір молекули водню зумовлює підвищені витоки крізь ущільнення: при 20% водню у суміші інтенсивність витоків у турбулентному режимі на 10% вища, ніж для природного газу, а нижня межа займистості знижується до 4,75%, що розширює діапазон вибухонебезпечних концентрацій при витоках і потребує перегляду підходів до моніторингу та аварійного захисту [5]. У свою чергу, компресорні станції потребують заміни ущільнень та перерахунку робочих характеристик агрегатів через відмінність молярної маси водню 2,016 г/моль від метану 16,04 г/моль [5].

Міжнародний досвід проєктів HyDeploy (Велика Британія), Fort Saskatchewan (Канада) та HyBend (США) підтверджує, що більшість існуючих газотранспортних систем здатні функціонувати без суттєвої модернізації при вмісті водню до 20% [5]. Тобто, перехід до транспортування чистого водню потребує комплексної модернізації системи, будівництво нових водневих газопроводів обходиться приблизно втричі дорожче, що робить адаптацію існуючої ГТС більш економічно привабливою [2].

Попри технічні обмеження, ГТС України має значний стратегічний потенціал для формування європейської водневої інфраструктури [1]. Географічне розташування визначає роль України як транзитної країни між виробниками та споживачами водню, що відповідає концепції EU Hydrogen Backbone – ініціативи з формування загальноєвропейської водневої мережі до 2040 року. Найбільш реалістичним першим кроком є блендування водню в природний газ на рівні 10-20%, що не потребує кардинальної реконструкції трубопроводів [2][5]. Але вимагає заміни еластомерних ущільнень на водневосумісні матеріали та системи моніторингу витоків. Подальший перехід до транспортування чистого водню можливий лише після проведення системної металографічної діагностики із застосуванням методів нелінійної механіки руйнування, першочергово для ділянок з терміном експлуатації понад 30 років та трубопроводів діаметром 1020-1420 мм [3][4].

Отже, ГТС України є потенційно придатною для транспортування воднево-метанових сумішей з концентрацією до 20% без кардинальної реконструкції, що визначає блендинг найреалістичнішим першим етапом. Основними обмеженнями є прихована деградація тріщиностійкості металу, що не виявляється стандартними методами контролю, підвищенні витоки та необхідність адаптації компресорного обладнання. Перехід до чистого водню можливий лише після системної діагностики методом J-інтеграла, насамперед для ділянок з терміном служби більше 30 років. Стратегічний потенціал ГТС України як транзитного водневого коридору є високим, однак потребує технічної діагностики, нормативно-правового врегулювання та координації з ініціативами.

ПОСИЛАННЯ

1. Януль С., Павлов К., Коротя М., Галянт С. Характеристика газотранспортної системи України. Економічний часопис Східноєвропейського національного університету імені Лесі Українки. 2019. № 1. С. 31–38. DOI: 10.29038/2411-4014-2019-01-31-38.
2. Nykyforchyn H. M., Zvirko O. I., Tsyulnyk O. T., Venhryniuk O. I. Assessing Hydrogen Embrittlement of Gas Pipeline Steels Using Fracture Mechanics Approaches. International Applied Mechanics. 2025. Vol. 61, No. 2. P. 207–211. DOI: 10.1007/s10778-025-01346-5.
3. Zvirko O., Tsyulnyk O., Venhryniuk O., Nykyforchyn H. Hydrogen Related Issues at Hydrogen Transport via Existing Gas Pipelines. TRANSBALICA XV: Transportation Science and Technology. Springer, Cham, 2025. P. 210–219.
4. Srivastava D., Arya A. K. Hydrogen Injection in Natural Gas Pipeline Networks. Recent Advances in Energy Transitions Towards Sustainable Development. Springer, Singapore, 2025. Vol. 67. P. 115–128.
5. Hussain M., Zhang T., Nazir U. Overview of Hydrogen Pipeline Infrastructure. Hydrogen Pipeline Integrity. Springer, Singapore, 2026. P. 27–43.

ВОДНЕВЕ ОКРИХЧЕННЯ СТАЛЕЙ: ВИКЛИКИ ДЛЯ РОЗВИТКУ ВОДНЕВОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

О. Звірко, Д. Демянчук, О. Венгринюк, О. Цирульник, Г. Никифорчин

Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка Національної академії наук України

вул. Наукова, 5, м. Львів, 79060, Україна,

тел.: (032)263-21-33, e-mail: olha.zvirko@gmail.com

Проаналізовано виклики для розвитку водневої інфраструктури України, які пов'язані з деструктивним впливом водню на сталі з урахуванням низки чинників, зокрема, експлуатаційною деградацією наявної тривало експлуатованої інфраструктури, умов експлуатації, напружено-деформованого стану металу, кількості водню, поглиненого металом, тощо.

Ключові слова: водень, водневе окрихчення, сталь, мікроструктура, експлуатація, деградація, механічні властивості.

HYDROGEN EMBRITTLEMENT OF STEELS: CHALLENGES FOR THE DEVELOPMENT OF HYDROGEN INFRASTRUCTURE IN UKRAINE

O. Zvirko, D. Demianchuk, O. Vengryniuk, O. Tsyurulnyk, H. Nykyforchyn

Karpenko Physico-Mechanical Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine,

5, Naukova St., Lviv 79060, Ukraine

phone: (032)263-21-33, e-mail: olha.zvirko@gmail.com

The challenges for the development of Ukraine's hydrogen infrastructure, which are associated with the destructive effect of hydrogen on steels, are analyzed, taking into account a number of factors, in particular, operational degradation of the existing long-term operated infrastructure, operating conditions, stress-strain state of the metal, amount of hydrogen taken up by a metal, etc.

Key words: hydrogen, hydrogen embrittlement, steel, microstructure, operation, degradation, mechanical properties.

ORCID: 0000-0002-6973-6804; 0009-0000-0021-8139; 0000-0001-6531-5300; 0000-0001-9038-966X; 0000-0003-1012-2901.

Водневі технології є ключовими для декарбонізації важливих секторів промисловості, тому розвиток водневої інфраструктури є надважливим для вирішення нагальних завдань «зеленої» трансформації енергетики України для забезпечення стабільності у сучасних умовах та є стратегічною ціллю держави [1, 2].

Негативний вплив водню на сталі тривалий час під постійною увагою науковців, інженерів та експлуатаційників. небезпека їх водневої крихкості пов'язана з наводнюванням під час експлуатації не лише у водні [3], але і в корозивно-наводнювальних середовищах [4], яке може відбуватися різними шляхами – дисоціація молекулярного водню, воднева деполяризація під час електрохімічної корозії, тощо. Однак лише частина виділеного водню абсорбується металом, що спричиняє його окрихчення і підвищення ризику неконтрольованого руйнування.

Воднева деградація сталей перлітного класу, яка може суттєво знижувати їх пластичність і в'язкість руйнування, сприяти зародженню та росту тріщин, утворенню розшарувань, залежить від багатьох чинників (особливостей мікроструктури, напружено-деформованого стану металу, ступеня наводнювання, умов експлуатації), що, відповідно, впливає на механізми руйнування (міжзеренне або крізьзеренне) через різні шляхи транспорту водню в металі. Для реалізації різних механізмів впливу водню на фізико-хімічні та фізико-механічні властивості сталей важливим також є його стан у металі, зокрема, атомарний, дифузійно-рухливий, чи молекулярний, тобто, пасткований. На зміну процесу деформування та руйнування сталей здебільшого впливає взаємодія металу з дифузійно-рухливим воднем. Водень, що акумулюється у пастках, зумовлює зміни у напружено-деформованому стані у локальних місцях та виникнення тріщин.

Широке використання сталей у водневій інфраструктурі, а також перепрофілювання конструкцій та обладнання для експлуатації у водні, може підвищувати ризик їх руйнування. Це зумовлено, з одного боку, загальновідомим негативним впливом водню на механічну поведінку сталей перлітного класу [3-6], а з іншого боку, під дією водню вони зазнають деградації [4, 5], що може посилювати їх схильність до водневого окрихчення під час експлуатації.

Крім того, важливо оцінити придатність сталей наявного обладнання/конструкцій до експлуатації у водні [7-9], якщо вони сконструйовані для іншого використання, а зараз є потреба у перепрофілюванні, зважаючи на стрімкий розвиток водневої енергетики.

На сьогодні розглядають різні механізми водневого окрихчення сталей [5-7]. Однак, досі немає одностайної позиції щодо сталей перлітного класу, а також існують теорії, непідтверджені експериментальними результатами. Відсутність систематизованих моделей взаємодії водню з реальними мікроструктурами сталей, що зазнали деградації під час експлуатації, не дозволяє достовірно оцінювати довговічність елементів наявної та майбутньої водневої інфраструктури. Тому необхідний подальший розвиток досліджень, вивчення фундаментальних механізмів водневої деградації сталей, формулювання та підтвердження нових теорій та підходів для її глибшого розуміння, а також розроблення відповідних моделей водневої деградації для оцінювання придатності сталей до тривалої експлуатації у водні. Це критично важливо для розробки нових сталей для водневих систем та перепрофілювання обладнання / металоконструкцій для експлуатації у водні.

ПОСИЛАННЯ

25. Воднева економіка – один зі стовпів відбудови та енергетичної трансформації України після перемоги: Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/vodneva-ekonomika-odyn-zi-stovpiv-vidbudovy-ta-enerhetychnoi-transformatsii-ukrainy-pislia-peremohy> (дата звернення: 12.03.2026).
26. Повідомлення про оприлюднення проекту розпорядження Кабінету Міністрів України «Про схвалення Водневої стратегії України на період до 2050 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації». URL: <https://mev.gov.ua/proyekt-normatyvno-pravovoho-aktu/povidomlennya-pro-oprylyudnennya-proyektu-rozporядzhennya-2> (дата звернення: 12.03.2026).
27. Kim S. J., Kim K. Y. An overview on hydrogen uptake, diffusion and transport behavior of ferritic steel, and its susceptibility to hydrogen degradation. *Corrosion Science and Technology*. 2017, 16(4), pp. 209-225. <https://doi.org/10.14773/cst.2017.16.4.209>
28. Nykyforchyn H., Tsyrunyk T., Zvirko O., Hredil M. Role of hydrogen in operational degradation of pipeline steel. *Procedia Structural Integrity*. 2020, 28, pp. 896–902. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.11.060>
29. Ohaeri E., Eduok U., Szpunar J. Hydrogen related degradation in pipeline steel: A review, *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018, 43(31), pp. 14584–14617. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.064>
30. Djukic M. B., Zeravcic V. S., Bakic G. M., Sedmak A., Rajicic B. Hydrogen damage of steels: A case study and hydrogen embrittlement model. *Engineering Failure Analysis*. 2015, 58, pp. 485–498. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2015.05.017>
31. Zvirko O., Nykyforchyn H., Krechkovska H., et al. Evaluating hydrogen embrittlement susceptibility of operated natural gas pipeline steel intended for hydrogen service. *Engineering Failure Analysis*. 2024, 163, 108472. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108472>
32. Laureys A., Depaetere R., Cauwels M., Depover T., Hertelé S., Verbeken K. Use of existing steel pipeline infrastructure for gaseous hydrogen storage and transport: A review of factors affecting hydrogen induced degradation. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2022, 101, 104534. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2022.104534>
33. Zvirko O. Hydrogen Embrittlement and Fracture Behavior of Aged Pipeline Steels: Challenges for Hydrogen Transport in Gas Infrastructure. *Procedia Structural Integrity*. 2026, 77, pp. 484–489. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2026.01.061>



Дослідження виконано за грантової підтримки проекту № 2025.07/0337 «Ентропійна модель деградації сталей перлітного класу водневої інфраструктури» Національним фондом досліджень України.

АНАЛІЗ ДОЦІЛЬНОСТІ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО АМОНІЮ В ЯКОСТІ НОСІЯ ВОДНЮ

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

Для декарбонізації економіки на прикладі Європейського союзу найбільш доцільним є виробництво зеленого амонію в якості носія водню. В залежності від вартості тони CO₂ зроблено порівняльний аналіз вартості сірого, голубого та зеленого амонію на території Європейського союзу.

Ключові слова: сірий амоній, голубий амоній, зелений амоній, водень, Потенціал Глобального Потепління, Система торгівлі викидами ЄС (EU ETS).

ANALYSIS OF PRODUCING GREEN AMMONIA AS A HYDROGEN CARRIER

M. N. Ulanov

Institute of Engineering Thermophysics Of National Academy Of Sciences Of Ukraine,
2a Marii Kapnist str., Kyiv, Ukraine, 03057
phone: (044) 424-96-42, e-mail: e3therm@gmail.com

To decarbonize the economy, following the European Union's lead, producing green ammonia as a hydrogen carrier is the most suitable choice. A cost comparison of gray, blue, and green ammonia within the EU has been carried out, factoring in the price per ton of CO₂.

Key words: gray ammonia, blue ammonia, green ammonia, hydrogen, Global Warming Potential, EU Emissions Trading System (EU ETS).

ORCID: 0000-0003-4639-8221.

Ammonia is vital as a fertilizer feedstock, but that's where its real value lies. Burning it for ships or power plants ignores its inefficiency and nitrogen oxide emissions. Producing ammonia from hydrogen only to break it down again for energy is a wasteful loop drains renewable power. In ammonia, hydrogen's true worth is chemical, not as fuel.

With green hydrogen, making a ton of ammonia fertilizer (about 0.18 tons of hydrogen per ton) can indirectly yield around 31 tons of biofuel through better crop growth and biomass conversion. This works because ammonia boosts feedstock crops, which then become raw material for biofuels – multiplying hydrogen's impact many times over. In contrast, using hydrogen directly as fuel or in synthetic fuels from captured carbon misses this "yield chain" advantage and remains far more energy-intensive and expensive. The bottom line: prioritizing hydrogen for fertilizer-driven bio-feedstock production offers much better near- to mid-term economic and carbon gains than using it as a direct energy carrier.

Global ammonia production hits about 180 million tons a year, with most made from natural gas, releasing roughly 2.4 tons of CO₂ per ton of ammonia just from process emissions, according to the International Energy Agency. Factoring in upstream methane leakage on a GWP20 basis, total climate impact jumps to around 2.7 to 3.2 tons of CO₂ per ton, depending on leakage rates of 0.5% to 1.5%. This is a major, concentrated source of emissions and a solid target for decarbonization.

Switching to blue hydrogen in Rotterdam could change the picture: blue hydrogen from natural gas with carbon capture usually lands between 1 and 4 kgCO₂ per kg of hydrogen on a GWP100 basis, depending on capture rates and methane leakage. Each ton of ammonia needs 176 kg of hydrogen, so at 1 kgCO₂ per kg hydrogen, that's 0.18 tons of CO₂ per ton of ammonia, and at 4 kgCO₂, it's 0.70 tons. Adding in remaining process and energy emissions, blue ammonia could come in at 0.6 to 1.8 tons of CO₂ per ton on a GWP20 basis, a bit lower on GWP100. Compared to 2.7 to 3.2 tons for grey ammonia, that's a cut of about 0.9 to 2.5 tons per ton – significant, but not full decarbonization.

One option for producing green ammonia is to set up operations in a sunny, windy location like Morocco and ship it to Rotterdam. In this setup, large-scale electrolysis generates hydrogen directly at the ammonia plant, with no methane feedstock or CO₂ capture involved. Electrolyzers outside China still cost about \$2,000 per kW installed, using roughly 50 to 55 kWh of electricity per kilogram of hydrogen. With power priced at \$30 per MWh and a 65% capacity factor, leveled hydrogen costs work out to around \$3.5 to \$5 per kilogram. Turning that hydrogen into ammonia takes the usual 176 kg

per ton, and shipping from Morocco to Rotterdam adds about \$20 to \$40 per ton. Delivered green ammonia would likely cost \$800 to \$1,000 per ton under current conditions. Operational emissions are minimal – hydrogen leakage of 0.2% to 1% at a GWP20 of about 33 equals 0.01 to 0.06 tons of CO₂ per ton of ammonia, plus another 0.02 to 0.04 tons from shipping – totaling just 0.03 to 0.11 tons, which is nearly zero compared to grey ammonia.

The cost of abatement highlights the tradeoff. In Rotterdam, grey ammonia at \$600 per ton compared to blue ammonia at \$650 means a \$50 premium. With blue avoiding an average of 1.5 tons of CO₂ per ton, the abatement cost is roughly \$33 per ton of CO₂. Green ammonia, at \$900 per ton and avoiding 2.8 tons, comes to about \$107 per ton of CO₂. While blue is cheaper per ton of CO₂ avoided, it falls short of near-zero emissions, whereas green, though costlier today, moves closer to full decarbonization.

The European carbon pricing framework is reshaping competitiveness. The EU Emissions Trading System applies GWP100 accounting for methane and other gases, giving methane a multiplier of about 28 compared to over 80 under GWP20. Hydrogen's indirect GWP100 falls between 8 and 12. Current carbon prices are around €73 per ton, but EU budget guidance projects shadow prices of €200 now, €250 in the mid-2030s, and €300 by the 2040s to align with climate goals. With 10 to 12 kgCO₂ per kg of hydrogen, grey hydrogen faces a carbon cost of €0.73 to €0.88 per kg at €73, and €2 to €3.6 per kg at €200 to €300. Grey ammonia becomes uncompetitive in a €200 to €300 market, while blue hydrogen starts losing ground around €130, and imported green ammonia from Morocco akes it near €150.

Blue hydrogen is less exposed to carbon costs but not immune. With 1 kgCO₂ per kg of hydrogen, a €300 carbon price adds €0.30 per kg; at 4 kg, it's €1.20 per kg for ammonia, that's €53 to €211 per ton. If base blue hydrogen costs €3.8 per kg, then with a €300 carbon price, it rises to €4.1 – €5 per kg.

Imported green hydrogen, at €4.5 per kg and minimal carbon exposure, stays around €795 per ton of ammonia for the hydrogen portion across all carbon price scenarios. Under strong carbon pricing, the real contest is between blue and imported green hydrogen, not grey versus blue.

Table 1. Ranges of costs for grey, blue and green ammonia under EU Emissions Trading System.

Carbon price, €/t CO ₂	Grey ammonia (NL), €	Blue ammonia (NL), €	Green ammonia (Morocco to NL), €
73	709 – 735	783 – 822	873 – 875
200	933 – 1,003	806 – 912	873 – 876
250	1,021 – 1,109	815 – 947	875 – 878
300	1,109 – 1,214	824 – 982	875 – 880

EU Emissions Trading System accounting based on GWP100 is a fiscal tool, not a climate physics measure. Methane and hydrogen have stronger short-term warming effects than GWP100 suggests; over 20 years, methane's multiplier is about three times higher. If policy matched short-term climate impacts, blue hydrogen face higher effective carbon costs. Still, investors and industrial buyers follow current EU Emissions Trading System rules, which make blue hydrogen look more competitive under GWP100 than GWP20, though it retains residual carbon exposure that grows as carbon prices increase.

In contrast, bringing in green industrial materials like low-carbon ammonia, green iron, or methanol from places with plenty of cheap renewable power helps keep industries competitive without subjecting the wider economy to volatile energy costs or costly, underused infrastructure. By importing these feedstocks, Germany and other European producers can cut carbon from upstream inputs while keeping high-value downstream manufacturing at home, protecting jobs and creating value without overhauling the entire energy system around hydrogen as a general energy carrier instead of a targeted industrial input. This way, green intermediates are treated as tradable goods that can be stored, contracted, and managed like any other commodity, rather than setting energy prices across the board, helping maintain an edge in global markets.

Europe's industry is aiming for near-zero emissions. Blue hydrogen cuts emissions compared to grey but still keeps fossil carbon in the mix. Green ammonia, made with renewable electricity, eliminates methane feedstock entirely and slashes emissions by over 95% compared to grey.

УДК 661.931

ОПТИМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОДИНИЧНОЇ КОМІРКИ ВОДНЕВО - КИСНЕВОГО ЕЛЕКТРОЛІЗЕРУ

Ю. К. Пірський¹, Я. В. Колосовський², А. В. Куций³

^{1,3}Інститут загальної та неорганічної хімії ім. В. І. Вернадського НАН України,
пр. Палладіна, 32/34, м. Київ, 03142, Україна,
тел.: (044) 225-15-16, e-mail: pirsky@ionc.kiev.ua

²Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського",
пр. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна

Представлено результати оптимізації одиної комірки воднево - кисневого електролізера води на основі мембранно-електродного блоку (МЕБ) та створено високоефективний електролізер. Показано, що основний вплив на експлуатаційні характеристики МЕБ електролізера мають природа каталізаторів, їх якість та питома площа. Варто відмітити, що товщина мембрани та тип газодифузійного шару не чинять суттєвого впливу на характеристики МЕБ.

Ключові слова: електролізне генерування водню та кисню, мембранно-електродний блок, електрокаталізатори, каталітичне чорнило.

OPTIMIZATION OF ELECTRICAL AND ENERGY CHARACTERISTICS OF A SINGLE CELL OF A HYDROGEN-OXYGEN ELECTROLYZER

Yu. K. Pirskey¹, Ya. V. Kolosovsky², A. V. Kutsyi³

^{1,3}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

²National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prosp. Beresteyskyi, Kyiv, 03056

The results of optimization of a single cell of a hydrogen-oxygen water electrolyzer based on a membrane-electrode assemblies (MEA) are presented and a highly efficient electrolyzer is created. It is shown that the main influence on the operational characteristics of the MEA of the electrolyzer is the nature of the catalysts, their quality and specific area. It is worth noting that the membrane thickness and the type of gas diffusion layer do not have a significant effect on the characteristics of the MEA.

Key words: generation of hydrogen and oxygen via electrolysis, membrane-electrode assembly, electrocatalysts, catalytic ink.

ORCID: ¹0000-0002-9431-4136; ²0000-0001-5924-1798; ³0000-0003-2576-7075

Відомо, що для паливних комірок доцільно використовувати як паливо високочистий водень. Одним із найперспективніших способів його одержання є електроліз води з твердополімерним електролітом (ТПЕ) [1], який забезпечує чистоту водню понад 99,99%. Водночас розвиток протонообмінних електролізних систем обмежується високою вартістю мембран і дорогіших металів-каталізаторів. Наразі відсутні недорогі метали, придатні як стабільні каталізатори для ТПЕ-електролізерів, тому актуальним є підвищення ефективності каталізаторів на основі благородних металів. На водневому електроді платина показує найкращі характеристики, і зазвичай саме її використовують для катода в електролізері з ТПЕ. Більшість енергетичних втрат пов'язані з електрохімічними процесами на аноді, де відбувається реакція виділення кисню. Тому, створення і оптимізація анодних електрокаталізаторів є дуже важливим етапом для реалізації ефективного електролізера води з ТПЕ. Кисле середовище і високі потенціали на аноді під час процесу електролізу призводять до корозії неблагородних каталітичних металів, таких як Ni і Co. Платина формує погано провідну оксидну плівку і показує високі значення перенапруги для реакції виділення кисню. Натомість Ir, Ru та їх оксиди проявляють високу активність у реакції виділення кисню.

Метою роботи була оптимізація одиної комірки воднево-кисневого електролізера на основі мембранно-електродного блоку (МЕБ) та створення високоефективного пристрою з платиновим катодним і іридієвим анодним каталізаторами для генерування водню та кисню.

Робота є продовженням попередніх досліджень, присвячених розробленню каталітичних шарів на основі Pt і Ir (у вигляді Pt черні на носії та іридієвої черні отриманої з додаванням полівінілпіролідону), створенню МЕБ, а також оптимізації та випробуванню одиної комірки [2].

Корпус комірки виготовлено на ЧПК-фрезерному верстаті за власними кресленнями з акрилового скла, що характеризується технологічністю та корозійною стійкістю. Конструкція передбачає канали для циркуляції води та відведення газоподібних продуктів. Основним елементом є МЕБ, методику виготовлення якого наведено в [2]. Струмopідвідні пластини з циркуляційними отворами: катодна — з нержавіючої сталі, анодна — з пористого титану для запобігання корозії. Герметичність забезпечували тефлоновими прокладками. Після збирання електрлізної комірки з МЕБ на початку експерименту здійснювалося термостатування комірки при температурі 20 °С, потім виставлявся струм рівний 0,5 А і в такому режимі комірка працювала ще протягом години. Необхідно відзначити, що в разі включення комірки без попереднього термостатування з наявною в системі водою, електролізер показував гірші значення потужності, що пояснюється недостатньою змоченістю мембрани. ВАХ знімали в діапазоні 0,1–2,5 В (з кроком 0,2 В до 1,2 В і 0,1 В надалі). Верхню межу напруги (2,5 В) встановлено для запобігання деградації МЕБ. Структура і склад анода, на якому відбувається виділення кисню, вимагає оптимізації. Були досліджені та оптимізовані різні композиції на основі Іг черні. На основі синтезованих каталізаторів були виготовлені і випробувані МЕБ електролізера. Отримані ВАХ електролізерів з твердим протонообмінним електролітом показали, що при збільшенні кількості анодного каталізатору (рисунок) покращуються експлуатаційні характеристики потужності електролізера. Проаналізувавши отримані експериментальні дані ми дійшли до висновку, що характеристики зростають не лінійно, оскільки дійсна активна площа каталізаторів зростає не лінійно внаслідок перекривання активних центрів та агломерації нанодисперсних часток при більшій кількості каталізатору на одиницю площі.

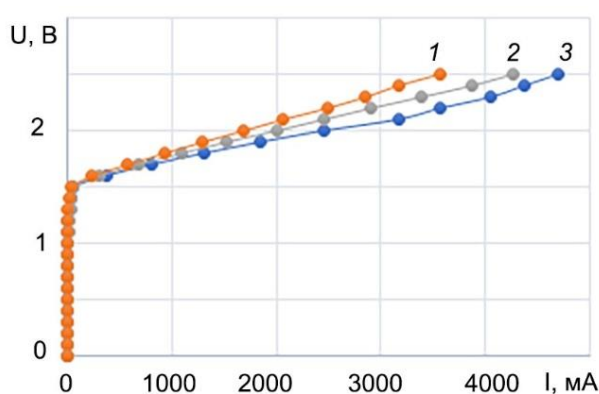


Рис. Зведений графік ВАХ МЕБ з різною кількістю нанесеного анодного Іг – електрокаталізатору:

1 – 1.5 мг/см², 2 – 2.0 мг/см², 3 – 2.5 мг/см².

Проведені дослідження впливу товщини та типу протонообмінної мембрани на роботу елемента з використанням мембран різного типу, а саме Nafion-115, Nafion-117, Fumapem F-950 з однаковими складом та кількістю нанесеного катодного та анодного електрокаталізаторів по 1 мг/см² показали, що ВАХ характеристики МЕБ електролізера з мембранами різної товщини, практично ідентичні, тобто товщина та тип цих мембран практично не впливає на параметри МЕБ. Аналогічно, тип газодифузійного шару (вуглецевий папір Sigracell 10B, вуглецева тканина та подвійна тканина) істотно не впливає на характеристики електролізера. Визначальними чинниками ефективності МЕБ є природа, якість і питома площа каталізаторів, тоді як товщина мембрани та тип газодифузійного шару мають другорядне значення.

Розроблена комірка електролізера має такі наступні електричні та енергетичні характеристики: номінальна напруга — 2,5 В; сила струму — 4,5 А; потужність — 11,25 Вт; робоча температура — 15–50 °С; активна площа — 6,25 см²; ресурс роботи — не менше 10 000 год. Отримані показники підтверджують ефективність пристрою та перспективність його практичного впровадження.

ПОСИЛАННЯ

1. Vedrtnam, A.; Kalauni, K.; Pahwa, R. Water Electrolysis Technologies and Their Modeling Approaches: A Comprehensive Review. Eng. – 2025. – V. 6(4), 81. <https://doi.org/10.3390/eng6040081>
2. Пірський Ю.К., Манілевич Ф.Д., Колосовський Я.В., Куций А.В. Мембранно-електродний блок для електролізного генерування водню та кисню // Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті: Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної конференції (Київ, 21-23 травня 2025 р.). – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2025. – С. 398-399. URL: <https://doi.org/10.36296/renewable.conf.21-23.05.2025>

ЕЛЕКТРОННА МОДЕЛЬ ВОДНЕВОЇ ПАЛИВНОЇ КОМІРКИ

С. В. Бойченко¹, Л. К. Лістовщик², В. П. Студенець³, І. О. Шкільнюк⁴, В. О. Коровушкін⁵

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна, тел.: +38(044)204-82-25, e-mail: chemmotology@ukr.net,
listovshchyk.leonid@ill.kpi.ua

Розглянуто значення електронного моделювання водневої паливної комірки в сучасних наукових дослідженнях. Обґрунтовано доцільність використання цифрових моделей для аналізу електрохімічних, теплових та масообмінних процесів. Показано переваги електронних моделей порівняно з фізичними експериментальними установками з точки зору економічної ефективності, безпеки та гнучкості досліджень. Ці дослідження виконувались в рамках науково-дослідного проекту, що фінансується за рахунок державного бюджету України (за Наказом Міністерства освіти і науки України від 09.01.2026 №23), а також ініціативних наукових тематик кафедри автоматизації електротехнічних і мехатронних комплексів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Ключові слова: воднева енергетика, паливна комірка, електронна модель, математичне моделювання, електрохімічні процеси, оптимізація.

ELECTRONIC MODEL OF A HYDROGEN FUEL CELL

S. Boichenko¹, L. Listovshchyk², V. Stoudenets³, I. Shkilnyuk⁴, V. Korovushkin⁵

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteyskyi Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine, tel.: +38(044)204-82-25, e-mail: chemmotology@ukr.net

The importance of electronic modeling of a hydrogen fuel cell in modern scientific research is considered. The feasibility of using digital models for the analysis of electrochemical, thermal and mass transfer processes is substantiated. The advantages of electronic models compared to physical experimental facilities are shown in terms of economic efficiency, safety and flexibility of research. The research is being carried out within the framework of work under Order of the Ministry of Education and Science No. 23 of January 9, 2026, funded by the Ministry of Education and Science of Ukraine.

Keywords: hydrogen energy, fuel cell, electronic model, mathematical modeling, electrochemical processes, optimization.

ORCID: ¹0000-0002-2489-4980; ²0000-0003-3413-1802; ³0000-0002-7513-798X; ⁴0000-0002-8808-3570; ⁵0000-0002-7571-7124

Вступ. Інтенсифікація розвитку водневої енергетики зумовлює необхідність створення ефективних методів аналізу та оптимізації роботи паливних комірок [1-4]. Воднева паливна комірка є електрохімічним пристроєм, що забезпечує безпосереднє перетворення хімічної енергії водню та кисню в електричну енергію з високим коефіцієнтом корисної дії та мінімальними шкідливими викидами.

У зв'язку з високою вартістю експериментальних досліджень та складністю фізичних процесів, що відбуваються в паливній комірці, особливої актуальності набуває застосування електронних (математичних) моделей.

Теоретичні засади електронного моделювання. Робота паливної комірки ґрунтується на протіканні електрохімічних реакцій окиснення водню на аноді та відновлення кисню на катоді. Реальна напруга комірки визначається з урахуванням ідеальної електрорушійної сили та втрат різної природи:

- активаційні втрати — пов'язані з кінетикою електродних реакцій;
- омичні втрати — зумовлені електричним опором мембрани та електродів;
- концентраційні втрати — виникають через обмеження масопереносу.

Електронна модель дозволяє аналітично або чисельно описати зазначені процеси за допомогою системи диференціальних та алгебраїчних рівнянь. Залежно від рівня деталізації розрізняють:

Емпіричні моделі, що базуються на експериментальних характеристиках.

Напівемпіричні моделі, які враховують фізичну природу втрат.

Фізико-хімічні моделі, що описують внутрішні процеси тепломасообміну та електрохімічної кінетики.

Переваги електронної моделі в наукових дослідженнях

Економічна доцільність. Створення та експлуатація експериментальних зразків паливних комірок потребує значних матеріальних витрат, зокрема через використання дорожочітних каталізаторів (платина) та спеціалізованих мембран. Електронне моделювання дає змогу суттєво скоротити витрати на дослідницькі роботи.

Підвищення рівня безпеки. Робота з воднем передбачає ризик виникнення вибухонебезпечних ситуацій. Використання цифрової моделі усуває небезпеку, пов'язану з фізичними експериментами, особливо на етапі попередніх досліджень.

Дослідження динамічних режимів. В умовах змінного навантаження паливна комірка працює в нестационарних режимах. Електронна модель дозволяє дослідити перехідні процеси, пускові режими, вплив температури та вологості, а також реакцію системи на різкі зміни струму навантаження.

Можливість інтеграції у складні енергетичні системи. Цифрова модель може бути інтегрована у комплексні системи електроживлення, зокрема в гібридні установки з акумуляторними батареями або відновлюваними джерелами енергії. Практичну реалізацію таких систем демонструють провідні виробники, зокрема компанія Toyota у транспортних засобах, наприклад, Toyota Mirai [5].

Науково-практичне значення. Електронні моделі широко застосовуються в програмних середовищах моделювання (MATLAB/Simulink, COMSOL Multiphysics та ін.). Їх використання забезпечує:

- проведення параметричної оптимізації;
- аналіз чутливості системи до зміни вхідних параметрів;
- прогнозування деградації елементів;
- прискорення процесу розроблення нових конструктивних рішень.

Особливої актуальності набуває поєднання моделей паливних комірок із системами керування, що дозволяє формувати алгоритми оптимального енергетичного менеджменту.

Висновки. Електронна модель водневої паливної комірки є ефективним інструментом сучасних наукових досліджень. Вона забезпечує можливість комплексного аналізу електрохімічних, теплових та масообмінних процесів, мінімізує витрати та ризики, пов'язані з експериментальними дослідженнями, і сприяє оптимізації параметрів системи. З огляду на глобальні тенденції розвитку сталої енергетики, цифрове моделювання паливних комірок виступає необхідною складовою інженерних та наукових розробок у сфері водневої енергетики.

ПОСИЛАННЯ

1. Воднева стратегія України: проєкт / Інститут відновлювальної енергетики НАН України. – Київ, 2021. – 91 с. ISBN 978-966-999-220-8
2. Korovushkin, V., Boichenko, S., Artyukhov, A., Ćwik, K., Wróblewska, D., & Jankowski, G. (2025). Modern Optimization Technologies in Hybrid Renewable Energy Systems: A Systematic Review of Research Gaps and Prospects for Decisions. *Energies*, 18(17), 4727. <https://doi.org/10.3390/en18174727>
3. Бойченко, С., & Гавриш, Д. (2025). Водень – Ефективний «інструмент» досягнення вуглецево-нейтрального майбутнього: досягнення, тенденції, виклики. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, 355(4), 39-47. <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-355-5>.
4. Boichenko, S., Chen, L., Korovushkin, V., & Biliakovych, O. (2025). PEST- AND SNW-ANALYSIS OF THE USE OF LIQUID HYDROGEN AS A MOTOR FUEL IN AVIATION. *System Research in Energy*, (1 (81), 61-73. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.061>
5. https://toyota.jp/mirai/?padid=from_carlineup_car_alphabetical_mirai

АНАЛІЗ ЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕЖИМІВ ПІД ЧАС МОДЕЛЮВАННЯ ПАЛИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ РЕМ

**С. В. Бойченко¹, В. О. Коровушкін², І. О. Шкільнюк³,
Л. К. Лістовицький⁴, В. П. Студенець⁵, Є.М. Бродніковський⁶**

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056, Україна,
тел.: (095) 768-63-93, e-mail: vitalijkorovuskin@gmail.com

Інтеграція паливних елементів з протоннообмінною мембраною (РЕМFC) у літальні апарати дозволяє збільшити тривалість польоту у 2–10 разів. Однак ефективне моделювання енергетичних режимів ускладнюється розривом між статичними моделями та динамічним середовищем польоту. У роботі проаналізовано вплив висоти, водного та теплового менеджменту на вольт-амперні характеристики системи та визначено критичні прогалини у сучасних підходах до моделювання.

Ключові слова: водневі паливні елементи (ПЕ), літальні апарати (ЛА), енергетичні режими, гібридні енергосистеми, моделювання ПЕ РЕМ, водний та тепловий менеджмент, керування енергоспоживанням.

ANALYSIS OF ENERGY MODES IN THE MODELING OF PEM FUEL CELLS

S. Boichenko¹, V. Korovushkin², I. Shkilnyuk³, L. Listovshchik⁴, V. Stoudenets⁵, Y. Brodnikovskiy⁶

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Beresteyskiy Ave., 37, Kyiv, 03056, Ukraine,
phone: (095) 768-63-93, e-mail: vitalijkorovuskin@gmail.com

The integration of proton exchange membrane fuel cells (PEMFC) into aircraft allows flight duration to be increased by 2–10 times. However, effective modeling of energy modes is complicated by the gap between static models and the dynamic flight environment. The paper analyzes the influence of altitude, water, and thermal management on the volt-ampere characteristics of the system and identifies critical gaps in current modeling approaches.

Keywords: Hydrogen Fuel Cells (FC), Aerial Vehicles (AVs) Hybrid Power Systems, PEMFC Modelling, Power Management Water and Thermal Management (WTM), Power Management.

ORCID: ¹0000-0002-2489-4980; ²0000-0002-7571-7124; ³0000-0002-8808-3570; ⁴0000-0003-3413-1802;
⁵0000-0002-7513-798X; ⁶0000-0002-4765-4349

Вступ. Основною мотивацією впровадження РЕМFC є подолання обмеженої енергоємності Li-Po акумуляторів. Проте низька швидкість динамічного відгуку ПЕ робить їх непридатними для різких змін навантаження, притаманних літальним апаратам (ЛА). Це вимагає гібридизації з акумуляторами, що перетворює задачу моделювання зі статичного розрахунку установки на комплексне керування енергетичними режимами в динаміці.

Фундаментальний розрив у моделюванні енергосистем. Енергетичний режим роботи ПЕ визначається вихідною напругою (V_{cell}), яка розраховується як ідеальний потенціал Нернста (E_{Nernst}) мінус три типи втрат: активаційні (V_{act}), омичні (V_{ohmic}) та концентраційні (V_{conc}) (1) [1].

$$V_{cell} = E_{Nernst} - V_{act} - V_{ohmic} - V_{conc} \quad (1)$$

Аналіз показує, що під час польоту всі складові напруги змінюються одночасно:

E_{Nernst} залежить від температури та парціального тиску газів.

V_{act} домінує при низьких густинах струму через енергетичний бар'єр реакції.

V_{ohmic} лінійно зростає через опір мембрани та контактів.

V_{conc} різко збільшується при високих навантаженнях через обмеження транспорту мас.

Статичні моделі виявляються неефективними, оскільки не враховують взаємовплив цих параметрів у реальних аеронавтичних умовах

Основні енергетичні режими, фактори впливу та прогалини в моделюванні паливних елементів PEM для ЛА наведені в таблиці 1.

Таблиця 1: Матриця основних енергетичних доменів та факторів впливу (дані синтезовані з [2-6])

Енергетичний домен	Ключовий фізичний виклик	Вплив на параметри моделі	Обмеження поточних моделей
Динаміка польоту	Перевантаження (g-load) та вібрації впливають на транспорт мас.	Зростання омичних втрат (V_{ohmic}) через втрату контактів; зростання V_{conc} .	Повна відсутність моделей та валідації для цих умов.
Висотність та тиск	Падіння парціального тиску кисню (pO_2) та зростання навантаження на компресор.	Зниження потенціалу Нернста (E_{Nernst}); зростання паразитарних втрат потужності.	Нелінійність. Моделі не оптимізують баланс між споживанням компресора та «голодуванням» ПЕ.
Водний та тепловий режим (WTM)	«Крихка рівновага» між «затопленням» електродів та висиханням мембрани.	Зростання V_{ohmic} при висиханні; зростання V_{conc} при «затопленні».	Моделі керування позбавлені фізичної точності; CFD-моделі занадто повільні для реального часу.
Холодний пуск	Утворення льоду в шарах ПЕ та блокування активних зон реакції.	Зменшення ефективної активної площі, що викривляє всі параметри напруги.	Моделі не є прогностичними, не здатні передбачити деградацію від стратегії пуску.
Валідація системи	Відсутність експериментальних даних «ground truth» безпосередньо з польотів.	Неможливість підтвердити точність розрахунків у реальних умовах.	Головна методологічна прогалина. Моделі залишаються теоретичними.

Висновки. Аналіз енергетичних режимів ЛА на базі PEMFC виявив критичний «вакуум валідації». Більшість існуючих моделей базуються на усталених електрохімічних станах, тоді як реальна експлуатація визначена перехідними процесами. Без отримання експериментальних даних безпосередньо в польоті розвиток точних моделей енергозабезпечення залишатиметься на теоретичному рівні, гальмуючи впровадження водневих технологій.

Подяка. Ці дослідження виконувались в рамках науково-дослідного проекту, що фінансується за рахунок державного бюджету України (за Наказом Міністерства освіти і науки України від 09.01.2026 №23), а також ініціативних наукових тематик кафедри автоматизації електротехнічних і мехатронних комплексів КПІ ім. Ігоря Сікорського.

ПОСИЛАННЯ

- Omran, A. et al. (2021) 'Mathematical model of a proton-exchange membrane (PEM) fuel cell,' International Journal of Thermofluids, 11, p. 100110. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100110>.
- Chen, S., Wang, X. and Zhu, T. (2023) 'Effect of mechanical vibration on the durability of proton exchange membrane fuel cells,' Nanomaterials, 13(15), p. 2191. <https://doi.org/10.3390/nano13152191>
- Hou, Y. et al. (2016) 'Effect of strengthened road vibration on performance degradation of PEM fuel cell stack,' International Journal of Hydrogen Energy, 41(9), pp. 5123–5134. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.01.072>
- Boichenko, S., Chen, L., Korovushkin, V., & Biliakovych, O. (2025). PEST- AND SNW-ANALYSIS OF THE USE OF LIQUID HYDROGEN AS A MOTOR FUEL IN AVIATION. System Research in Energy, (1 (81), 61-73. <https://doi.org/10.15407/srenergy2025.01.061>
- БойченкоS., & Chen, L. (2024). COMPARATIVE ANALYSIS OF HYDROGEN PRODUCTION, ACCUMULATION, DISTRIBUTION, AND STORAGE SYSTEMS. System Research in Energy, (3 (79), 13-20. <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.03.013>
- Korovushkin, V. and Boichenko, S. (2025). Latest advances in fuel cell technologies and optimistic scenarios for their application in aircraft power systems: global achievements, critical analysis and implementation trends. International Journal of Sustainable Aviation, 11(4), pp.355–380. <https://doi.org/10.1504/ijsa.2025.150674>.

СТРУКТУРИ ПІДСИСТЕМ КОНТРОЛЮ ПОЛОЖЕННЯ ЗАПІРНИХ ВЕНТИЛІВ СТАЦІОНАРНИХ ЕЛЕКТРОЛІЗЕРНИХ УСТАНОВОК ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ

Зайцев Є.О.¹, Кромплас Б.А.², Левицький А.С.³

^{1,2,3} Інститут електродинаміки НАН України,
проспект Берестейський, 56, 03057, Київ, Україна
тел.: (068)240-25-73, e-mail: b_kromp@i.ua

У доповіді розглядаються структури підсистем контролю положення запірних вентилів на базі вибухобезпечних сенсорів крайніх положень запірних вентилів для електролізерних установок виробництва водню. Запропоновано ємнісні та оптичні сенсори крайніх положень, що забезпечують високу вибухозахищеність, мінімізацію ліній зв'язку та підвищення надійності.

Ключові слова: водень, вибухобезпека, сенсори, система.

STRUCTURES OF SUBSYSTEMS FOR CONTROLLING THE POSITION OF SHUT-OFF VALVES OF STATIONARY ELECTROLYZER PLANTS FOR HYDROGEN PRODUCTION

Zaitsev Ye.O.¹, Kromplyas B.A.², Levytsky, A.S.³,

^{1,2,3}The Institute of Electrodynamics of the NAS of Ukraine
56 Beresteyskiy avenue, 03057, Kyiv, Ukraine
Phone: (068)240-25-73, e-mail: b_kromp@i.ua

In report considers the structures of subsystems for controlling the position of shut-off valves based on explosion-proof sensors of the extreme positions of shut-off valves for electrolysis plants for hydrogen production. Capacitive and optical sensors of the extreme positions are proposed, which provide high explosion protection, minimize communication lines and increase the reliability of control.

Key words: hydrogen, explosion safety, sensors, system.

ORCID: ¹0000-0003-3303-471X; ²0000-0001-7164-8056; ³0000-0002-0146-9498

В [1] обґрунтовується, що встановлення в стаціонарних електролізерних установках добування водню, які експлуатуються на АЕС України, підсистем контролю положення запірних вентилів підвищує надійність їх роботи. На рис. 1 приведена функціональна схема концентратора сенсорів положення вентилів (КСПВ) з ємнісними сенсорами положення вентилів СПВ, на якій показано СПВ для вентиля з робочим ходом в 180°. Робочий вал 1 сенсора безпосередньо зв'язується з робочим валом вентиля. На корпусі сенсора 2 в точках крайніх положень вентиля (відкритий – закритий) розміщені чутливі елементи 3 і 4, що являють собою конденсатори C1 і C2, утворені плоско – паралельними електродами. На валу закріплена екрануюча пластина 5. Ємність конденсаторів C1 і C2 вимірюється і перетворюється в код мікропотужним перетворювачем ємності CDC. Функції керування вимірюванням і обміну даними з КСПВ виконує мікроконтролер сенсора МКС.

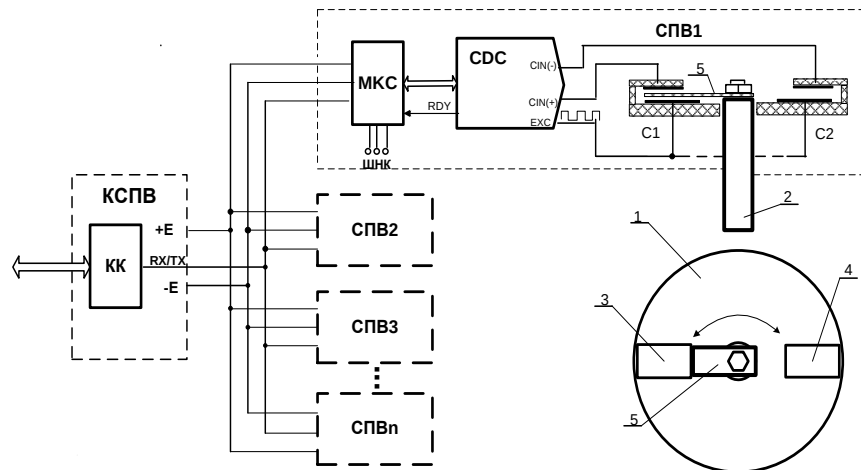


Рисунок 1

Ознакою перебування вентиля в одному із крайніх положень є різке зменшення ємності відповідного конденсатора С1 або С2 при входженні між його електродів екрануючої пластини 5. МКС після циклу вимірювання обох ємностей на основі результатів вимірювань і занесених калібровочних значень цих ємностей при відсутності пластини 5, формує код стану вентиля: відкрито – закрито – проміжне і після запиту від контролера КК передає код стану в КСПВ. Ці калібровочні значення визначаються в процесі калібрування сенсора, який ініціалізується з шин ШНК налагоджування – калібрування мікроконтролера МКС і в процесі роботи сенсора не функціонують. З них же встановлюється адреса сенсора в інтерфейсі сенсорів з КСПВ. При застосуванні послідовного асинхронного однопровідного інтерфейсу з протоколом запит – відповідь, розділеними в часі і індивідуальну адресацію сенсорів можна організувати інтерфейс сенсорів до відповідного КСПВ 3-провідною магистраллю: 2 шини – живлення сенсорів, 3-я – шина даних. В стані очікування всі контролери сенсорів перебувають в режимі прийому даних. Цикл обміну починається з передачі від КК коду ініціалізації обміну та адреси сенсора, після чого КК переходить в режим прийому даних. МКС вибраного сенсора виконує цикл визначення стану вентиля і формує код відповіді та передає цей код по шині обміну RX/TX. Слід відзначити, що і CDC і МКС реалізуються в мікроінтегральному виконанні, що дозволяє їх розміщення безпосередньо в корпусі сенсора. Таким чином, підсистема моніторингу стану вентилів на базі запропонованих ємнісних сенсорів вимагає мінімального числа ліній зв'язку і, відповідного числа електричних комутаций на сенсорі, що підвищує ступінь вибухозахищеності підсистеми в цілому.

Найоптимальнішим способом забезпечення вибухозахищеності сенсорів особливо в небезпечних зонах слід вважати взагалі відсутність підводу комутованих електричних провідників. Для цього було розроблено оптичний сенсор з відкритим оптичним каналом і зв'язком з КСПВ через волокно оптичну лінію, функціональна схема якого представлена на рис. 2. В закритому корпусі сенсора вмонтований чутливий елемент, що представляє собою інтеграцію випромінювального та фотоприйомного каналів, що з'єднуються з індивідуальними оптоволоконними лініями 1 і 6 передачі світлового випромінювання. Вал 9 сенсора безпосередньо з'єднується з робочим валом вентиля. На валу 9 в крайніх точках робочого ходу вала вентиля встановлені рефлектори 7 з нанесеними дзеркальними шарами 8. Ці рефлектори встановлюються також і на різних відстанях від чутливого елемента.

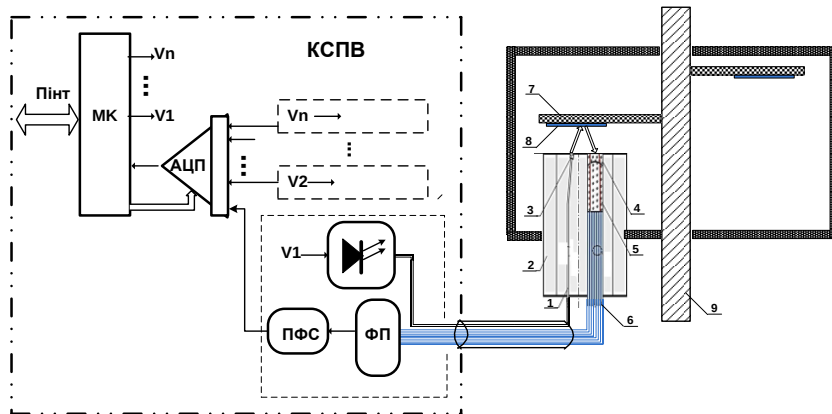


Рисунок 2

В склад КСПВ входять мікроконтролер МК, багатоканальний АЦП та селекторні канали зв'язку $V1 - Vn$ із сенсорами положення вентилів. В склад селекторного каналу входять емітер випромінювання, фотоприймач ФП і посилювач фотоструму ПФС. Цикл визначення положення вентиля починається зі збудження емітера випромінювання відповідним сигналом $V1 - Vn$ від МК. Світловий сигнал проходить через оптоволокно 1 і лінзу 3, відбивається від одного з рефлекторів 7 (або не відбивається за відсутності над лінзою 3 рефлектора). Відбитий промінь через лінзу 5 і оптоволоконний джгут 6 попадає на фотоприймач ФП, збуджує в ньому фотострум, який посилюється посилювачем ПФС і отриманий сигнал оцифровується АЦП, обробляється МК і згенерований код стану вентиля передається контролеру підсистеми. В залежності від наявності (відсутності) рефлектора над чутливим елементом отримується 3 градації рівня вимірюваного сигналу:

- сигнал відсутній (або дуже малий) за відсутності рефлектора;
- сигнал більший/ менший за наявності ближчого/ дальшого від прийомної лінзи рефлектора.

Це дає можливість однозначно ідентифікувати стан вентиля. МК обробляє отримані значення вимірюваного сигналу, співставляючи їх з каліброваними значеннями, отриманими в процесі калібрування сенсора вже при встановленій робочій довжині волоконно – оптичного кабеля.

Таким чином, розроблений сенсор володіє високим ступенем вибухозахищеності, оскільки на нього не подається жодного електричного сигналу. При сучасному розвитку оптоелектроніки такі сенсори можуть бути віддалені від концентраторів на відстань до сотні метрів.

ПОСИЛАННЯ

1. Кромплас Б.А., Левицький А.С., Зайцев Є.О. Система моніторингу і контролю експлуатаційних параметрів електронних установок з виробництва водню на АЕС України. Відновлювана енергетика. №3, 2025 С.155-163

УДК. 621.311.24

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОЛІЗУ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ ЗА ДОПОМОГОЮ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ

Д. Ю. Ткаченко

*Інститут відновлюваної енергетики Національної академії наук України,
03143, вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна.
тел. (050) 644-52-93, e-mail: tkachenkodyws@gmail.com*

Виконано оцінку стану застосування різних технологій електролізу для виробництва водню за допомогою енергії вітру. Проаналізовано найбільш актуальні методи, розглянуто чинники, що можуть покращити техніко-економічних показники процесів перетворення води у водень

Ключові слова: *відновлювані джерела енергії, вітроустановка, виробництво водню з енергії вітру, виробництво водню електролізом води, електролізер.*

APPLICATION OF ELECTROLYSIS TECHNOLOGY FOR HYDROGEN PRODUCTION FROM WIND ENERGY

D. Tkachenko

*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*

The assessment of various electrolysis technologies for hydrogen production from wind energy has been conducted. The most relevant methods have been analyzed, and factors that can improve the technical and economic indicators of the processes of converting water into hydrogen have been considered.

Key words: *renewable energy sources, wind turbine, wind power hydrogen production; water electrolysis hydrogen production, electrolyzer.*

Вітрова енергія, як чисте та відновлюване джерело енергії, має важливе значення для пом'якшення наслідків зміни клімату та активізації глобальних ініціатив щодо досягнення вуглецевої нейтральності [1]. Протягом останніх років кількість реалізованих проєктів вітрової енергетики швидко зростає, що призводить до помітного збільшення частки відновлюваної енергії в загальній енергетичній структурі світу [2]. Однак збільшення потужностей вітрової генерації стикається зі значними перешкодами, включаючи затримки у спорудженні та модернізації мережевої інфраструктури та притаманну волатильність і нестабільність виробітку вітрової енергетики [4]. Обидва ці фактори загрожують стабільності роботи електричної мережі, що є постійною проблемою для цього сектору.

Водень, як новий енергоносіє, має яскраво виражені переваги завдяки високій щільності енергії та легкості зберігання. Поєднання вітрової генерації та технології електролізу води для виробництва водню пропонує три ключові переваги [5]:

- енергія вітру, яка характеризується як «безпосереднє» джерело енергії, може бути перетворена на водень. При тривалому зберіганні у вигляді газу високого тиску або криогенної рідини це перетворення призводить лише до незначних втрат енергії;
- процес виробництва водню може зменшити нестабільність електричної мережі, спричинену мінливістю вітру. Використовуючись як актив для зменшення піків та компенсуючи циклічне зниження виробітку, він також пом'якшує вплив мінливості вітрової генерації;
- перевезення водню за допомогою транспорту або транспортування за допомогою модернізованих нафтогазових провідів є можливим. Це не лише зменшить потребу в будівництві складних об'єктів інфраструктури, але й сприятиме подальшому розвитку ініціатив у сфері вітрової енергетики.

На кінець 2024 року світове виробництво водню досягло приблизно 150 мільйонів тон на рік, проте лише 1% виробленого водню можна класифікувати як «зелений водень», отриманий з відновлюваної енергії [6].

Для виробництва водню з відновлюваної енергії окрім безпосередньо електричної енергії необхідно безперервне та значне постачання прісної води для електролізу. Цей аспект породжує виклики для економічної привабливості проєктів, адже традиційні технології очищення або опріснення води створюють серйозні проблеми з точки зору енергоемності, оскільки залишаються значною мірою залежними від викопного палива, що визначає їх високу вартість. Так, вартість опріснення води зазвичай знаходиться у діапазоні 5–10 доларів США за тону.

З точки зору методів електролізу води, варто відзначити три найбільш розповсюджені технології:

- електролізу ALK (Alkaline Water Electrolysis) виробництва водню шляхом розкладання води на водень і кисень за допомогою електричного струму в лужному електроліті;
- електролізу PEM (Proton Exchange Membrane) розкладання води на водень і кисень за допомогою електричного струму, де замість рідкого електроліту використовується тверда полімерна протон-обмінна мембрана;
- електролізу SOEC (Solid Oxide Electrolysis Cell) розкладання води, що працює при дуже високих температурах і використовує твердий керамічний електроліт, що проводить іони кисню.

Відповідно до [3], половина з розглянутих проєктів використовують технологію електролізу ALK, 40% покладаються на технологію PEM, і лише 10% застосовують технологію SOEC для процесів високотемпературного електролізу.

Наразі технологія ALK має найбільший досвід використання і відома своєю найнижчою вартістю та найдовшим терміном служби. Однак ця технологія вимагає регулярної заміни лужних розчинів, що, безсумнівно, збільшує витрати на обслуговування виробництва водню з використанням вітрової енергетики. Крім того, лужні електролізери не здатні до швидкого запуску та зупинки, а їхня адаптивність до мінливості вітрової енергії є слабкою; тому вони частіше використовуються в сценаріях зі стабільними умовами роботи, таких як виробництво водню на спеціалізованих хімічних підприємствах. Крім того, лужні електролізери є великими та важкими, що накладає певні обмеження до географії розташування об'єктів виробництва водню.

На відміну від технології ALK, електролізери технології PEM можуть працювати з робочим навантаженням лише 5–10% від номінального. Окрім цього ця технологія має можливість швидкого запуску та зупинки, що може ефективно відповідати характеристикам нестабільності відновлюваної енергії. Електролізери даного типу особливо підходять для сценаріїв виробництва відновлюваної водневої енергії. Однак поточна вартість є відносно високою, а термін служби набагато коротший, ніж у лужних електролізерів.

На даний час лише одиничні проєкти досліджують технологію SOEC. Серед усіх технологій електролізу технологія SOEC має найвищу ефективність. Вона не потребує каталізаторів з дорогоцінних металів, тому її потенційна вартість може бути набагато нижчою. Крім того, електроліт, електрод та біполярні пластини виготовлені з керамічних матеріалів, які можуть краще протистояти корозії в морському середовищі. Однак технологія SOEC вимагає високотемпературного середовища (500–1000° C), і стабільне джерело тепла неможливо отримати в морському середовищі. Незважаючи на свій потенціал для високої ефективності, вона наразі не може бути застосована у великих масштабах [23,24].

Європа очолює високотехнологічні дослідження, зосереджуючись на технології PEM та централізованих проєктах офшорних вітрових електростанцій. Натомість Китай покладається переважно на технологію ALK та виробництво водню на березі, пропонуючи швидке масштабування, але меншу технологічну різноманітність. Оскільки витрати на технологію PEM знижуються, а проєкти морської вітрової енергетики поширюються на глибші води, централізоване виробництво водню на основі технології PEM, ймовірно, стане мейнстрімом. Для Китаю прискорення локалізації PEM матиме вирішальне значення для підвищення адаптивності до коливань виробітку вітрової енергетики.

Останнім часом ведуться інтенсивні роботи з вивчення можливостей використання морської води безпосередньо для електролізу. Ця концепція має революційний потенціал, але вона все ще перебуває на стадії фундаментальних лабораторних досліджень і стикається з серйозними економічними та екологічними проблемами.

На даний час багато вчених працюють над освоєнням цієї технології. У статті [8] вчені надають інформацію про новий катод для електролізу морської води.

Каталізатор із спеціального матеріалу утворює фазу воднево-вольфрамової бронзи шляхом постійного введення водню у воду, створюючи динамічне локальне кислото подібне середовище поблизу активних центрів. Це середовище сприяє реакції утворення водню при розщепленні морської води та нейтралізує іони гідроксиду, запобігаючи осадженню, дозволяючи катоду підтримувати стабільність. Вчені [8] побудували експериментальну систему потужністю кіловат з використанням технології водного електролізу «гідрофобна PTFE-мембрана + концентрований гідроксид калію». Лабораторні та 10-денні випробування показали стабільне виробництво водню протягом більше ніж 240 годин зі споживанням енергії ~5,0 кВт·год/нм³ та чистотою >99,9%. Команда також використовувала густий гелієвий електроліт з хорошою іонною провідністю та водоуповільнювальною здатністю для прямого електролізу морської води [9]. Ця система використовує необроблену морську воду та показала стабільну роботу протягом понад

400 годин. Вчені провели паралельні випробування [10] шафи SOEC (4 комірки) з деіонізованою/морською парою: морська вода прискорила деградацію вдвічі та збільшила втрати іонів. Втрати іонів є ключовими при використанні морської води для виробництва водню за допомогою технології SOEC.

Таким чином, подальші дослідження та пошук нових рішень в царині використання енергії вітру для отримання водню мають велике значення для покращення техніко-економічних показників процесів перетворення води у водень. Для подальшого покращення продуктивності системи слід розробити інтелектуальні системи керування виробітком вітрової енергії та виробництвом водню. Ці системи можуть динамічно регулювати робочі параметри електролізера на основі вхідної енергії вітру в режимі реального часу, тим самим досягаючи вищої ефективності перетворення та максимізуючи використання обладнання. Крім того, розширення використання технологій рекуперації відпрацьованого тепла може підвищити загальну ефективність системи. Наприклад, відпрацьоване тепло, що утворюється під час виробництва водню, можна було б повторно використовувати для опріснення морської води або інших допоміжних процесів, що зрештою зменшить споживання енергії на одиницю виробленого водню.

ПОСИЛАННЯ

1. Feng, S.; Wang, W.; Wang, Z.; Song, Z.; Yang, Q.; Wang, B. Global wind-power generation capacity in the context of climate change. *Engineering* **2024**, 51, 86–97
2. Ji, Z.; Qin, J.; Cheng, K.; Zhang, S.; Wang, Z. A comprehensive evaluation of ducted fan hybrid engines integrated with fuel cells for sustainable aviation. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2023**, 185.
3. Hai Jiang, Li Xiong, Wangyinhao Chen, Dazhou Geng, Bofeng Xu. Offshore Wind-to-Hydrogen Production: Technical Pathways, Challenges, and Prospects. *Appl. Sci.* **2026**, 16, 211
4. Ren, G.; Liu, J.; Wan, J.; Guo, Y.; Yu, D. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions. *Appl. Energy* **2017**, 204, 47–65.
5. He, Q.; Shen, Y. Development status of technology for wind-hydrogen coupled energy storage system. *Therm. Power Gener.* **2021**, 50, 9–17.
6. Obanor, E.I.; Dirisu, J.O.; Kilanko, O.O.; Salawu, E.Y.; Ajayi, O.O. Progress in green hydrogen adoption in the African context. *Front. Energy Res.* **2024**, 12, 1429118.
7. Bao, D.; Huang, L.; Gao, Y.; Davey, K.; Zheng, Y.; Qiao, S.-Z. Dynamic Creation of a Local Acid-like Environment for Hydrogen Evolution Reaction in Natural Seawater. *J. Am. Chem. Soc.* **2024**, 146, 34711–34719
8. Liu, T.; Zhao, Z.; Tang, W.; Chen, Y.; Lan, C.; Zhu, L.; Jiang, W.; Wu, Y.; Wang, Y.; Yang, Z.; et al. In-situ direct seawater electrolysis using floating platform in ocean with uncontrollable wave motion. *Nat. Commun.* **2024**, 15, 5305.
9. Tang, W.; Zhao, Z.; Yang, D.; Liu, Y.; Zhu, L.; Wu, Y.; Lan, C.; Jiang, W.; Wu, Y.; Liu, T.; et al. A gel electrolyte-based direct seawater electrolysis. *Energy Environ. Sci.* **2025**, 18, 7048–7059.
10. Liu, Z.; Wu, A.; Sang, J.; Han, B.; Zhang, Y.; Guan, W. Degradation of solid oxide electrolysis stacks in seawater and deionized water electrolysis. *J. Power Sources* **2025**, 661, 238627.

ВИРОБНИЦТВО «ЗЕЛЕНОГО» ВОДНЮ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЕНЕРГІЇ ВІТРУ ЗІ СТІЧНИХ ВОД ВУГІЛЬНИХ ШАХТ

О. Г. Молибог

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 03143, Україна,
тел.: (095) 505-90-04, e-mail: almolibog@gmail.com*

Сучасна вугільна промисловість України переживає важкі часи, що викликані комплексом техніко-економічних причин із додатковим суттєвим впливом екологічних та суспільних питань. Одним із таких проблемних питань є відкачування та утилізація супутніх ґрунтових вод. У дослідженні запропоновано використання промислових площадок вугільних шахт для розгортання систем для виробництва «зеленого» водню, а як джерело енергії для підйому води, її демінералізації та живлення електролізерів використовувати енергію відновлюваних джерел, насамперед енергію вітру та виконано оцінку забезпеченості водним ресурсом по декількох ділянках.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, вітроенергетика, «зелений» водень, локальні електричні мережі, шахтні стічні води.

GREEN HYDROGEN PRODUCTION FROM COAL MINE WASTEWATER USING WIND ENERGY

O. Molyboh

*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*

The modern coal industry of Ukraine is experiencing significant challenges caused by a combination of technical and economic factors, further intensified by environmental and social issues. One of the pressing problems is the pumping and utilization of associated groundwater. This study proposes the use of industrial sites of coal mines for the deployment of systems for green hydrogen production. Renewable energy sources, primarily wind energy, are considered as the power supply for water lifting, its demineralization, and the operation of electrolyzers. In addition, an assessment of water resource availability was carried out for several sites.

Keywords: renewable energy sources, wind energy, green hydrogen, local power grids, coal mine wastewater.

Кам'яне вугілля поступово втрачає свою вагу в європейській економіці [1], а сама сировина заміщується або іншими викопними ресурсами, або CO₂ нейтральними джерелами. Україна не залишилась осторонь від сучасних тенденцій і через низку об'єктивних та суб'єктивних причин пригальмовує розвиток вугільної промисловості. Проте у недалекому минулому вуглевидобуваючі підприємства відігравали значну як економічну, так і соціальну роль у регіоні Центрального та Західного Донбасу і у Львівсько-Волинському вугільному басейні. Відтак у цих регіонах були створені потужні промислові кластери, що поєднували у собі потреби в електричній енергії, значні логістичні можливості, достатні площі для виробничих майданчиків. Отже із зменшенням видобутку копалин ці потужності фактично вивільнились і мають бути використані для суспільної вигоди.

Окремим аспектом виробничого процесу видобутку вугілля шахтним способом є втручання в гірничо-геологічні умови, зокрема вплив на водоносний комплекс у місцях розташування підприємств. Отже, техногенний водоносний комплекс вимагає постійного підйому підземних вод на поверхню для забезпечення безперервного виробничого циклу. Обсяги водовідливу різняться в залежності від глибини та розгалуженості шахтних виробіток та місцевих умов. Крім того, потреба у відкачуванні цих вод залишається нагальною і після закриття шахт, а обсяги дебіту води зменшуються лише на 10-40%. Як правило ця вода використовується лише частково, а в більшості випадків збирається у відповідних ставках та відстійниках і з часом негативно впливає на екологічні умови прилеглих територій та громад.

Отже, на вугільних шахтах збігаються декілька важливих факторів для виробництва водню: i) промислова та логістична інфраструктура, ii) водний ресурс, iii) джерело енергії, із врахуванням сучасних потужних вітрових енергетичних установок (ВЕУ), iv) соціальна та екологічна необхідність. На рисунку 1 показана структурна схема системи для виробництва «зеленого» водню із використанням шахтних вод.

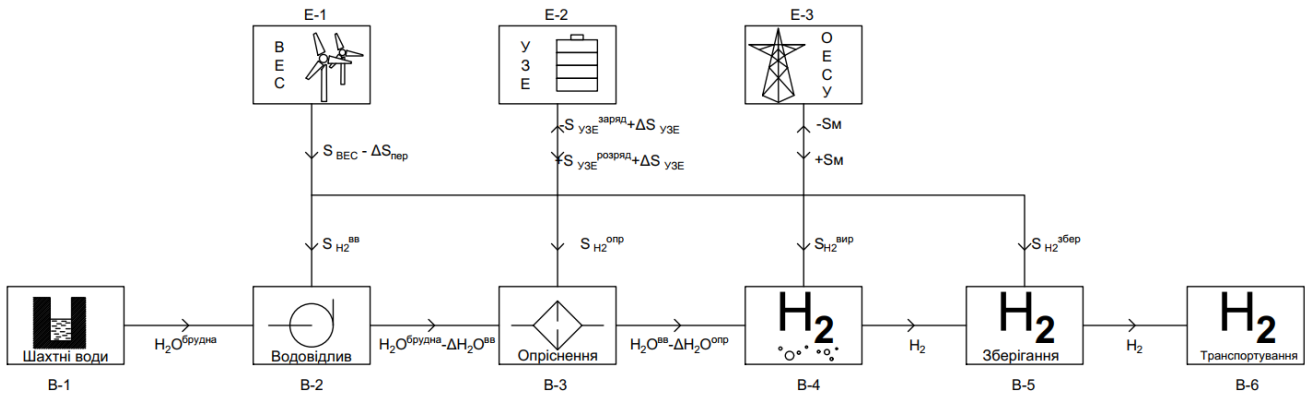


Рисунок 1 – Структурна схема виробництва «зеленого» водню із використанням шахтних вод, де E-1 – вітрова електрична станція; E-2 – установка зберігання енергії; E-3 – приєднання до електричних мереж; B-1 – підземні водопріливи; B-2 – система водовідливу; B-3 – установки з водопідготовки та опріснення; B-4 – РЕМ електролізер; B-5 – установки зберігання та відвантаження готового водню; B-6 – системи транспортування водню в т.ч. залізничним транспортом.

На території України і енергетичні, і водні ресурси, маються на увазі обсяги шахтного водопріливу, неоднорідні – тому для загальної оцінки потенціалу та можливості реалізації таких систем по всіх вугільних регіонах країни. Тому, для цілей дослідження було обрано чотири вугільних виробничих об'єднання, що розташовані в різних регіонах країни:

- Торецьквугілля (Центральний Донбас), м. Торецьк, Донецької області;
- Павлоградвугілля (Західний Донбас), м. Павлоград, Дніпропетровська область;
- Львіввугілля (Львівсько-Волинський басейн), м. Шептицький, Львівська область;
- Мирноградвугілля (Центральний Донбас), м. Мирноград, Донецької області.

По обраних промислових ділянках визначено забезпечення енергетичним та водним ресурсами для подальшого поширення підходу на інші регіони із великими обсягами забруднених вод гірничої промисловості.

Забезпечення енергетичним ресурсом.

У рамках системи, що розглядається, потреби системи забезпечуються фактично із трьох пов'язаних джерел: вітрова електрична станція – основне джерело електричної енергії для підйому води, опріснення та перетворення води на водень, а також додатково для заряджання установки зберігання енергії та за наявності надлишків їх віддачі до системи розподілу; установка зберігання енергії – основна задача, це підтримання установок з опріснення та електролізерів у режимі очікування (т.з. режим “standby”); система розподілу або передачі для покриття навантаження в режимах зупинки ВЕС з причин довілля (штиль, обледеніння тощо) та ремонтних робіт на ВЕС.

Загалом одночасність процесів виробництва і споживання електроенергії вимагає дотримання балансу між її генерацією і навантаженням у сталому режимі [2]:

$$\sum S_{\text{генерації}} = \sum S_{\text{споживання}} \quad (1)$$

Із (1) отримано рівняння балансу потужності локальної мережі системи, що показана на рисунку 1.

$$S_{\text{BEC}} - \Delta S_{\text{BEC}} - S_{\text{UZE}}^{\text{заряд}} - \Delta S_{\text{UZE}}^{\text{заряд}} + S_{\text{UZE}}^{\text{розряд}} - \Delta S_{\text{UZE}}^{\text{розряд}} + S_{\text{M}} - S_{\text{M}} - S_{\text{H}_2}^{\text{вв}} - S_{\text{H}_2}^{\text{опр}} - S_{\text{H}_2}^{\text{вир}} - S_{\text{H}_2}^{\text{збер}} = 0 \quad (2)$$

де S_{BEC} – потужність ВЕС, МВт; ΔS_{BEC} – втрати потужності ВЕС, МВт; $S_{\text{UZE}}^{\text{заряд/розряд}}$ – потужність заряду/розряду УЗЕ, МВт; $\Delta S_{\text{UZE}}^{\text{заряд/розряд}}$ – втрати на перетворення та зберігання енергії, МВт; S_{M} – перетікання потужності з системи розподілу, МВт; $S_{\text{H}_2}^{\text{вв}}$ – навантаження водовідливу, МВт; $S_{\text{H}_2}^{\text{опр}}$ – навантаження опріснення, МВт; $S_{\text{H}_2}^{\text{вир}}$ – навантаження електролізера, МВт; $S_{\text{H}_2}^{\text{збер}}$ – навантаження установки збереження водню, МВт.

Оскільки основним джерелом енергії для системи виробітку «зеленого» водню є вітрова електрична станція, то ключовим питанням є визначення потенціалу енергії вітру в регіоні розміщення. У таблиці 1 наведені дані по питомому енергетичному потенціалу вітрового потоку, що отримані із 70 метеорологічних станцій по всій території України на висоті 10м та 100м [2].

Таблиця 1 – Енергетичний потенціал досліджуваних регіонів.

№	Досліджуваний регіон	Питома щільність енергії на висоті, Вт/м ²	
		10 м	100м
1	Торецьквугілля (Центральний Донбас)	50-100	200-250
2	Павлоградвугілля (Західний Донбас)	50-75	200-250
3	Львіввугілля (Львівсько-Волинський басейн)	25-50	100-150
4	Мирноградвугілля (Центральний Донбас)	50-100	200-250

Дані, що наведено у таблиці, показують різну забезпеченість енергетичним потенціалом для різних регіонів, і в західному регіоні є меншою, що може вимагати більшої кількості вітрових установок для покриття потреб системи. Для площадки з найнижчим (з тих, що розглядаються) енергетичним потенціалом - Львіввугілля (Львівсько-Волинський басейн) - була проведена оцінка виробітку електричної енергії для ВЕУ класу 5+МВт із діаметром ротора більше 160м за даними найближчої верифікованої метеостанції та наведена в таблиці 2.

Таблиця 2 – Оцінка середньорічного виробітку електричної енергії в регіоні розміщення гірничих об'єктів Львіввугілля.

Параметр	Значення
Середній середньорічний виробіток, тис.кВт*год	11 352,61
Мінімум, тис.кВт*год	5 535,63
Максимум, тис.кВт*год	17 030,78
Вітропотенціал, Вт/м кв	48,33

Отже, однієї п'ятимегаватної турбіни може бути достатньо для забезпечення енергією сучасних РЕМ електролізерів для виробництва понад 206 тон водню на рік із використанням понад 4100 м³ підготовленої води. У той же час, визначення параметрів розподілу потужності та виробленої ВЕС енергії за окремими споживачами в загальному вигляді складна задача, а отримані граничні значення відрізнятимуться в рази. Наприклад, параметри та конфігурація системи водовідведення є індивідуальними для кожної шахти і залежать від водяного дебету, глибини та розгалуженості шахтних виробіток і можуть оцінюватися від 1 до 5 МВт. Те саме можна сказати і про системи водопідготовки, демінералізації та опріснення води і потужність електролізерів які залежать від водного ресурсу, логістичних можливостей.

Отже, зважаючи на фактичну неможливість визначення загального співвідношення параметрів рівняння 2 для локальної енергетичної системи (в закордонній термінології microgrid) що складається із вітрової електричної станції, накопичувача енергії та системи виробництва «зеленого» водню, для кожного проєкту необхідно вирішення оптимізаційної задачі мінімізації перетоку потужності та електричної енергії з системи розподілу.

Забезпечення водним ресурсом.

Як було зазначено вище, дебіт шахтної води залежить від місцевих умов і може відрізнятися протягом року. Водоприплив є процесом безперервним хоча і не рівномірним за обсягами протягом року; і для забезпечення сталої роботи системи відкачування вода збирається в проміжних ємностях, обсягом близько 250м³ і періодично відкачується, а відтак цей режим може бути пристосованим під добові коливання виробітку ВЕС або, за умов штилю, до періодів низьких цін на ринку електричної енергії. У таблиці 3 наведені дані по загальному водоприпливу шахт, що потрібно відкачувати та в подальшому виконувати її демінералізацію.

Таблиця 3 – Орієнтовні обсяги водного ресурсу та потенціал у досліджуваних регіонах.

№	Досліджуваний регіон	Дебіт шахтних вод, тис. м ³ /рік	Обсяг підготовленої води, тис. м ³ /рік	Потенціал виробництва H ₂ , тис. т./рік
1	Торецьквугілля (Центральний Донбас) [4]	9 111	3 644	243

№	Досліджуваний регіон	Дебіт шахтних вод, тис. м³/рік	Обсяг підготовленої води, тис. м³/рік	Потенціал виробництва H ₂ , тис. т./рік
2	Павлоградвугілля (Західний Донбас)	11 355	4 542	302
3	Червоноградвугілля (Львівсько-Волинський басейн)	2 000	800	53
4	ш. Капітальна, ДП «Мирноградвугілля» (Центральний Донбас)	2 803	1 121	74

Залежно від хімічного складу піднятої на поверхню шахтної води на підготовку витрачається до **40-60%** на підготовку та опріснення. Результуючий, «чистий» (Net), обсяг води показано в таблиці 3, що можна використовувати для оцінки водного ресурсу для виробництва «зеленого» водню. Потреби сучасних РЕМ електролізерів в підготовленій воді різняться залежно від виробника та розміру установки і складає від **13 до 20 л** води на 1 кг водню. У таблиці 3 показано максимальний річний потенціал виробітку «зеленого» водню з припущення потреби в **15 л** підготовленої води на один кілограм водню та втрат на опріснення за песимістичним сценарієм до **60%** від загального дебету. Потенціал виробництва «зеленого» водню, що наведено в таблиці 3, не є рівномірним по території України і цілком співпадає із розподілом енергетичного потенціалу.

Окремим вкрай важливим питанням є демінералізація води, що планується для виробництва водню. Якщо в порівнянні із морською водою підземні води мають нижчі показники TDS ніж морська вода, то їх склад відмінний від морської і складається здебільше з дев'яти основних іонів: Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Fe⁺⁺, Fe⁺⁺⁺, Cl⁻, SO₄⁻, HCO₃⁻ [6] та можуть відрізнятися залежно від місця забору – з трубопроводу чи вже із ставків-накопичувачів або відстійників, в яких відбувається очищення шахтних вод від зважених речовин з доведенням вмісту до потрібної концентрації [5,7]. У таблиці 4 наведені дані щодо загальної мінералізації шахтних вод у порівнянні із морською водою північно-західної частини Чорного моря.

Таблиця 4 – Порівняння гідрохімічного складу шахтної та морської води.

№	Параметр	Од. виміру	Морські води	Шахтні води	
			Чорне море	Центральний Донбас (ш. Центральна, Мирноград)	Л.-Волинський басейн (Червоноград-вугілля)
1	TDS	мг/л	11 000 – 17 000	~ 3 000 – 4000	922 – 6 941
2	pH	-	7,8-8,2	2,7-8,0	2-7,6
3	Тип води	-	Na-Cl	SO ₄ -Na; Na-Cl	Cl-SO ₄ -Na
4	Na ⁺	мг/л	~5 700-6 000	~620	підвищення
5	Cl ⁻	мг/л	~ 9800 – 10 400	~267	136 - 466
6	SO ₄ ²⁻	мг/л	~ 1 300	~ 1 030	180 - 6 299
7	Ca ²⁺	мг/л	~250-300	підвищ.	52 - 474
8	Mg ²⁺	мг/л	~600-700	підвищ.	19,2 – 55,2
9	Жорсткість	-	помірна	значне перевищення норм	значне перевищення норм
10	Fe(заг.)	-	~0.05	підвищ.	6,2 -26,8
11	Важкі метали	-	Природний фон	Hg, As, Pb	Zn, Pb, Cu
12	Рекомендована технологія опріснення	-	BWRO (15–25 бар) Ефективніше ніж SWRO (55–70 бар) завдяки солоності лише ~17 PSU	1. Нейтрал. кислоти (вапно) якщо AMD 2. NF → видалення SO ₄ ²⁻ , Ca ²⁺ 3. BWRO (антискейлант CaSO ₄)	1. Нейтралізація (вапно) — кисл. шахти 2. Осадження FeSO ₄ , CaSO ₄ 3. BWRO або EDR 4. Біоплато — підтерикові стічні

				4. Активне вугілля (Cyclamate, TFA)	

Отже, з огляду на важливість, велику варіативність (навіть у рамках одного басейну) та об'ємність питання підготовки та опріснення шахтних вод вимагають окремого дослідження.

Також можна наголосити на логістичних можливостях саме шахтних площадок. Кожна з шахт має розвинуту систему залізничного транспорту, а вугільні об'єднання навіть відповідні служби для організації відвантаження вугілля. Також, останнім часом спостерігається тенденція на розвиток можливостей транспортування водню залізницею [8,9], а обсяг може становити від 500кг [10] до 8000 кг (при транспортуванні із аміаком або метанолом [9]) на один вагон.

В заключення, необхідно підкреслити загальну складність реалізації таких проєктів через перетинання різноспрямованих проблемних питань, а саме:

- науково-практичні – розробка концепції ефективної системи повного циклу використання шахтних вод від підйому їх на поверхню до перетворення на «зелений» водень;
- технічні – реалізація збалансованих енергетичних локальних або мікромереж за умови негарантованого графіку надходження електричної енергії від ВЕС, приєднання системи виробництва водню до існуючої інфраструктури;
- соціальні та екологічні - виклики для територіальної громади, яка перебуває під впливом негативних факторів, що спричинені шахтними водами;
- економічні - проблеми функціонування вугільних шахт, насамперед тих, що перебувають у державній власності;
- інвестиційна привабливість таких проєктів.

З огляду на вищезазначене, вирішення такої задачі потребує комплексного підходу із залученням Держави, науковців, представників громад і бізнесу. Проте, поєднання потенціалу з виробництва «зеленого» водню, енергетичних та логістичних можливостей, соціальної та екологічної важливості робить такі проєкти унікальними.

ПОСИЛАННЯ

1. EU coal production and consumption reach historical low. 2025. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20250703-1> (дата звернення 25.02.2026)
2. Електрична частина станцій та підстанцій: курс лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»/уклад.: О.В. Остапчук, П.Л. Денисюк, Ю.П. Матєєнко/КПІ ім. Ігоря Сікорського, – Електронні текстові дані (1 файл: 4,62 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 183 с.
3. 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. ISBN 978-966-999-034-2
4. Бойко К.Є. Особливості формування режиму підземних вод при затопленні шахт Торецько-Єнакієвської гірничо-промислової агломерації.: дис.канд. геолог.н.:04.00.06/Бойко Катерина Євгенівна;Інститут геологічних наук НАН України. – К.,2021.-163 ст.
5. Environmental monitoring of groundwater from the “Centralna” coal mine in eastern Ukraine/O. Bohomaz, Y.Zbykovskyy, I.Shvets:Materials XVIII International Scientific Conference “Monitoring of Geological Process and Ecological Condition of the Environment”. – Kyiv, 2025.
6. Мнухина Н.А. Шахтные воды и модельный раствор шахтных вод. с.201-206. Екологічні науки №8., К: ДЕА,2015. - 214с. URL: <https://econj.dea.kiev.ua/archives/2015/8/22.pdf> (дата звернення 27.02.2026 р.)
7. Войтович С.П. Геохімія шахтних вод Львівсько-Волинського кам'яновугільного басейну(на прикладі Червоноградського гірничопромислового району).: автореф. дис.канд. геолог.н.:04.00.02/Войтович Світлана Петрівна;Інститут геохімії, мінералогії та рудоутворення імені М.П. Семененка НАН України. – К.,2017.-25 ст.
8. Network Rail's Test Tracks takes centre stage as hydrogen is delivered by rail for the first time. Електронний ресурс: NetworkRail.2025. URL:<https://www.networkrailmediacentre.co.uk/news/network-rails-test-tracks-takes-centre-stage-as-hydrogen-is-delivered-by-rail-for-the-first-time>.(дата звернення 05.03.2026)
9. Strong logistic for our future: DB Cargo tackles the climate neutral transport of green hydrogen. DB Cargo [Електронний ресурс] URL: <https://www.dbcargo.com/rail-de-en/hydrogen> (дата звернення 05.03.2026)
10. Hydrogen Transport Container (H2Tainer) Developed for Green Steel Production. IndexBox [Електронний ресурс] URL: <https://www.indexbox.io/blog/hydrogen-transport-container-h2tainer-developed-for-green-steel-production/> (дата звернення 05.03.2026)

**ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ДИНАМІКИ ГЕНЕРУВАННЯ ПОТУЖНОСТІ
ВІТРОЕЛЕКТРИЧНОЮ СТАНЦІЄЮ В АЗОВО-ЧОРНОМОРЬСЬКОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ
З МЕТОЮ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ПОТУЖНИХ АВТОНОМНИХ КОМПЛЕКСІВ З ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ**

Р. М. Сусак

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (050) 381-06-49, e-mail: sysak_r@yahoo.com*

Проведено статистичне оцінювання параметрів, що характеризують динаміку виробництва електроенергії вітроелектричною станцією в Азово-Чорноморському регіоні України.

Ключові слова: вітроелектрична станція, Азово-Чорноморський регіон, автономний комплекс, зелений водень, безперервність енергозабезпечення.

**RESEARCH INTO THE POWER OUTPUT DYNAMICS OF WIND POWER PLANT
IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF UKRAINE TO ENSURE CONTINUOUS POWER SUPPLY
FOR LARGE-SCALE AUTONOMOUS GREEN HYDROGEN PRODUCTION FACILITIES**

R. M. 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*

Statistical estimation of parameters characterizing the dynamics of electricity production from a wind power plant located in the Azov-Black Sea region of Ukraine was conducted.

Key words: wind power plant, Azov-Black Sea region, autonomous complex, green hydrogen, continuity of energy supply.

ORCID: 0000-0003-4474-4776

Розвиток водневої енергетики належить до пріоритетів України та Європейського Союзу на найближчі десятиліття [1]. Програмою «2x40 GW Green Hydrogen Initiative» [2] передбачається спорудження в Україні до 2030 року технологічних комплексів для виробництва зеленого водню загальною потужністю до 10 ГВт. Використання енергії відновлюваних джерел для електроживлення цих комплексів потребує пошуку ефективних технічних рішень для забезпечення їх безперервної роботи з урахуванням випадкового характеру генерування потужності відновлюваними джерелами та стабільної потреби в енергії їх компонентів.

В умовах України виробництво зеленого водню технічно та економічно доцільне в Азово-Чорноморському регіоні, де наявні достатні ресурси морської води та є необхідний потенціал для виробництва електроенергії вітроелектричними станціями (ВЕС). Для сучасних систем опріснення морської води, що побудовані на технологіях зворотного осмосу, стабільність енергопостачання є критичною, оскільки часті ввімкнення та вимкнення суттєво скорочують термін служби мембран, а гідравлічні удари внаслідок раптових стрибків напруги можуть спричинити повне руйнування обладнання [3]. Враховуючи значну загальну потужність споживання, приєднання технологічних комплексів виробництва зеленого водню до енергосистеми України на даний час не є можливим, тому необхідно розглянути варіанти автономного енергозабезпечення. Сукупність перелічених факторів зумовлює складність задачі узгодження параметрів споживання і виробництва електроенергії для таких комплексів. Одним із шляхів вирішення цієї задачі є застосування накопичувачів електроенергії (НЕ) [4] в складі системи енергозабезпечення. Тома актуальною є задача визначення параметрів динаміки генерування потужності для оптимального вибору параметрів НЕ.

В дослідженні використано ретроспективні дані процесу $p(t)$ генерування потужності прибережною ВЕС в Азово-Чорноморському регіоні України за річний період, які виміряно з дискретністю в 1 годину та виражено у віднос-

них одиницях (в.о.) з метою уніфікації результатів. Вибрано два рівні потужності: мінімальний $p_{\min} = 0.1$ в.о. і максимальний $p_{\max} = 0.35$ в.о. (Зазначимо, що вибір конкретних значень залежить від співвідношення номінальної потуж-

ності споживання устаткування та встановленої потужності ВЕС.) Вважатимемо, що при $p(t) < p_{mn}$ є дефіцит потужності ВЕС, тому для живлення устаткування витрачається накопичена енергія. При $p(t) > p_{mx}$ є надлишок потужності ВЕС, тому енергії вистачає не лише на забезпечення устаткування, а ще й на заряджання НЕ. На рис. 1 представлено періоди дефіциту та надлишку потужності, які характеризуються тривалістю τ (рис. 1).

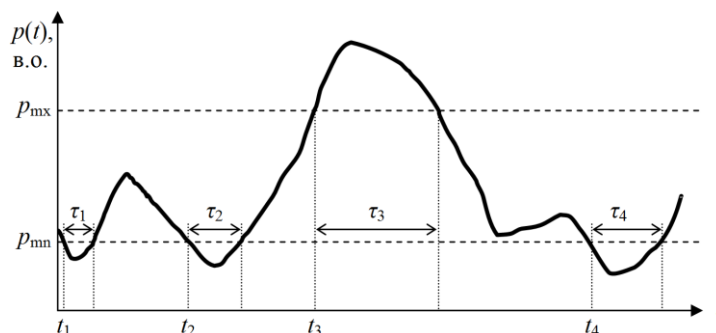


Рис. 1. Інтервали дефіциту і надлишку потужності ВЕС.

На основі аналізу наявних ретроспективних даних побудовано послідовності $\xi_{mn} = \{\tau_1, \tau_2, \tau_4, \dots\}$ та $\xi_{mx} = \{\tau_3, \dots\}$, для кожного місяця окремо і впродовж року, та проведено оцінювання їх статистичних параметрів: кількість інтервалів, середнє та максимальне значення (рис. 2), середньоквадратичне відхилення. Ці параметри можуть використовуватися в подальшому для наближеного розрахунку системи НЕ.

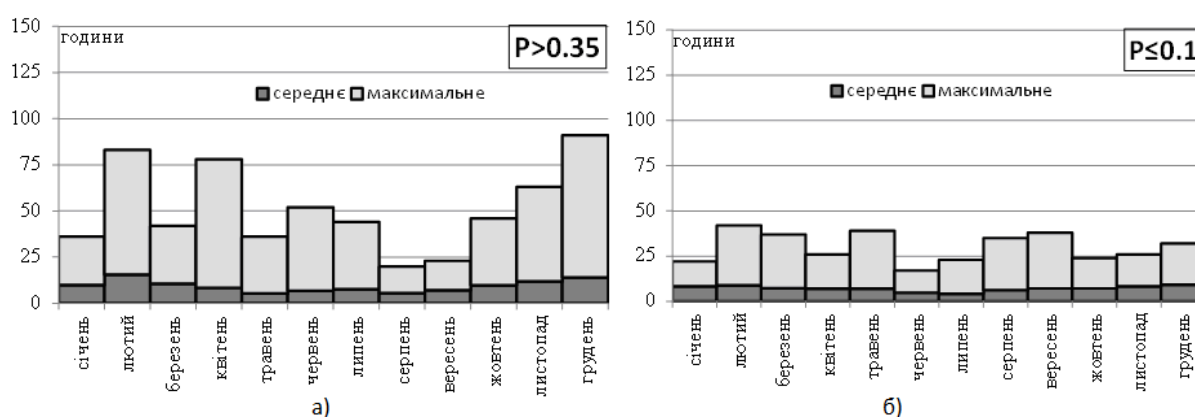


Рис. 2. Середні та максимальні значення тривалості надлишку (а) та дефіциту (б) потужності ВЕС по місяцях року.

Для більш точних розрахунків проведено оцінювання емпіричних щільностей розподілу та їх згладжування за допомогою аналітичних виразів експоненційного та двопараметричного Вейбулівського розподілів для річного періоду в цілому, оскільки наявних даних недостатньо для побудови розподілів помісячно. Обидва ці розподіли показали достатньо точне наближення до емпіричних даних в області великих значень, тоді як в області малих значень (виключаючи нуль) розподіл Вейбулла більш точний.

Проведені дослідження дають можливість оцінити надійність роботи ВЕС на одночасне забезпечення корисного навантаження та накопичення енергії, необхідної для гарантування безперебійного функціонування обладнання автономних технологічних комплексів виробництва зеленого водню з використанням енергії ВЕС в Азово-Чорноморському регіоні України.

ПОСИЛАННЯ

1. Воднева енергетика. URL: <https://mev.gov.ua/storinka/vodneva-enerhetyka> (дата звернення: 25.02.2026).
2. Van Wijk A., Chatzimarkakis J. (2020). Green Hydrogen for a European Green Deal: A 2x40 GW Initiative. Hydrogen Europe. URL: https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Hydrogen-Europe_2x40-GW-Green-H2-Initiative-Paper.pdf (дата звернення: 25.02.2026).
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. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.047.
4. Kebede A. A., Kalogiannis T., Van Mierlo J., Bercebar M. (2022). A comprehensive review of stationary energy storage devices for large scale renewable energy sources grid integration. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 159, 112213. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112213.

ОЦІНЮВАННЯ ГАРАНТОВАНОГО ПОХОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЗЕЛЕНОГО ВОДНЮ В ІНТЕГРОВАНІЙ ЕНЕРГЕТИЧНІЙ СИСТЕМІ

П. Д. Лежнюк¹, О. О. Рубаненко², І. О. Гунько³, М. Бєлік⁴

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, 02094, м. Київ, Україна*

Інтегровані енергетичні системи формуються в умовах децентралізації генерування, розвитку відновлюваних джерел енергії та впровадження Smart Grid технологій, поєднуючи електроенергію, тепло і газ в єдину інфраструктуру. Важливим споживачем у таких системах є електролізер, що використовується для виробництва водню та балансування потужності. Для визначення зеленого статусу водню необхідно оцінити походження спожитої електроенергії. У роботі запропоновано математичну модель визначення гарантованого походження електроенергії на основі матричного аналізу перетоків потужності, що дозволяє кількісно оцінити внесок відновлюваних джерел у живлення споживача та забезпечити фізично обґрунтоване підтвердження виробництва зеленого водню.

Ключові слова: інтегрована енергетична система, гарантоване походження електроенергії, зелений водень.

ASSESSMENT OF GUARANTEED ORIGIN OF ELECTRICITY FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION IN AN INTEGRATED ENERGY SYSTEM

P. D. Lezhniuk¹, O. O. Rubanenko², I. O. Hunko³, M. Belik⁴

*The Institute of Renewable energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrologichna St., 02094, Kyiv, Ukraine*

Integrated energy systems are formed under conditions of generation decentralization, development of renewable energy sources, and implementation of Smart Grid technologies, combining electricity, heat, and gas within a unified infrastructure. An important consumer in such systems is the electrolyzer, which is used for hydrogen production and power balancing. To determine the “green” status of hydrogen, it is necessary to assess the origin of the consumed electricity. This paper proposes a mathematical model for determining the guaranteed origin of electricity based on a matrix analysis of power flows, which makes it possible to quantitatively evaluate the contribution of renewable energy sources to supplying a specific consumer and to provide a physically justified confirmation of green hydrogen production.

Key words: integrated energy system, guarantees of origin of electricity, green hydrogen.

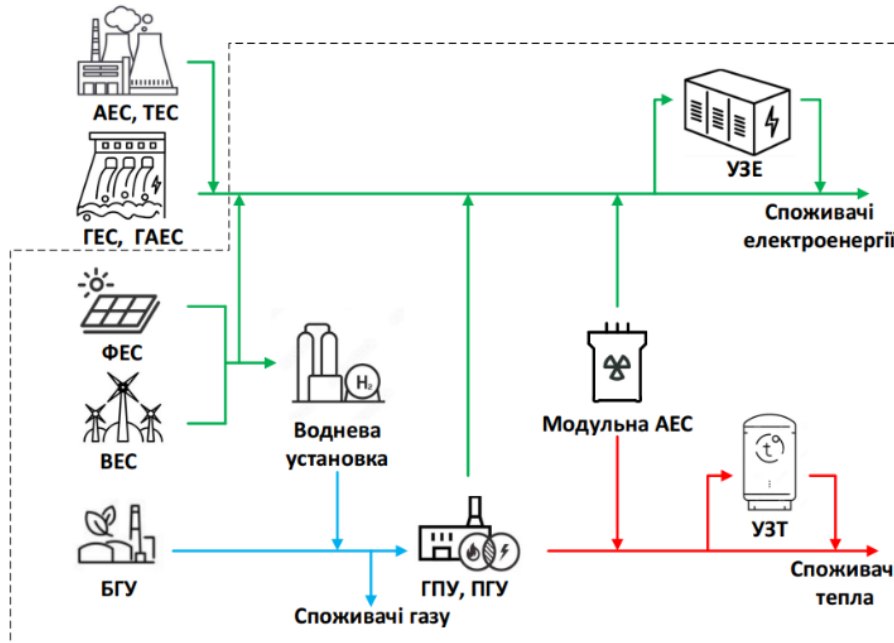
ORCID: ¹0000-0003-0338-2131, ²0000-0002-2660-182X, ³0000-0003-2868-4056, ⁴0000-0002-9907-5365

Постановка задачі.

Декарбонізація енергетичного сектору передбачає масштабне впровадження вітрових і сонячних електростанцій (ВЕС, СЕС) та інших низьковуглецевих джерел енергії, що супроводжується переходом до децентралізованого генерування, формуванням локальних електроенергетичних систем (мікромереж) та накладає додаткові умови щодо керування режимами електроенергетичної системи. У цих умовах формується новий тип енергетичних систем — інтегровані енергетичні системи (ІЕС), які об'єднують електричні, теплові та газові мережі в єдину багаторівневу інфраструктуру з інтелектуальним керуванням на основі технологій SMART Grid, штучного інтелекту (AI) та Інтернету речей (IoT). Зростання частки розпорошених джерел енергії з мінливим графіком генерування призводить до необхідності забезпечення балансу потужності в реальному часі. Одним із ефективних інструментів підвищення гнучкості ІЕС є використання електролізерів, які можуть бути керованим електричним навантаженням, споживаючи надлишки електричної енергії для виробництва водню (Power-to-Gas) [1]. При цьому водень, в режимах дефіциту потужності, може бути використаний як енергоносіє для виробництва електроенергії.

Ключовою умовою класифікації водню як «зеленого» є використання електроенергії з відновлюваних або низьковуглецевих джерел. Однак у реальних умовах роботи ІЕС електроенергія, що надходить до споживача, формується

як результат складних перетоків потужності в мережі загального призначення, що ускладнює визначення її фактичного походження. Існуючі механізми гарантій походження (Guarantees of Origin, GO) здебільшого базуються на ринкових принципах і не враховують фізичні закони розподілу потоків потужності в електричних мережах. У зв'язку з цим актуальним є розроблення методів, що дозволяють визначити внесок окремих джерел генерації, зокрема ВЕС і ГЕС, у живлення конкретного споживача з урахуванням топології мережі, параметрів мережі та втрат електроенергії. У дослідженні запропоновано математичну модель визначення гарантованого походження електроенергії, яка базується на матричному методі, що дозволяє враховувати топологію мережі, характер навантажень та генеруючих потужностей. Такий підхід дозволяє кількісно оцінити частку електроенергії від ВНДЕ (відновлюваних та низьковуглецевих джерел енергії), спожитої електролізером, і забезпечує фізично обґрунтовану основу для підтвердження «зеленого» статусу виробленого водню. З точки зору декарбонізації для підприємств, що функціонують у межах ІЕС, важливо мати інструменти кількісного визначення частки потужності, отриманої з низьковуглецевих джерел, з урахуванням втрат під час передачі електроенергії.



У межах інтегрованих енергетичних систем споживачами «зеленого» водню можуть виступати як промислові, так і енергетичні об'єкти, що потребують низьковуглецевих енергоносіїв та гнучких інструментів балансування. До таких споживачів належать підприємства металургійної та хімічної промисловості (для виробництва сталі, аміаку, метанолу), транспортний сектор (промисловий транспорт, залізничний та морський транспорт), а також енергетичні установки, що використовують водень як засіб накопичення та подальшого перетворення енергії (Power-to-Gas / Gas-to-Power). У структурі ІЕС водень виконує функції енергоносія, технології довгострокового зберігання енергії та засобу підвищення гнучкості системи за рахунок споживання електроенергії в режимах профіциту генерування від ВДЕ. Це дозволяє зменшити викиди CO₂, підвищити ефективність використання станції, що працюють на ВДЕ.

Використовуючи алгоритм визначення походження електроенергії запропонований у [2], потужність спожиту електролізером в ІЕС можна представити у вигляді (1):

$$P_{BY} = \sum_{i \in \text{ВНДЕ}} \alpha_i P_i + \sum_{j \in \text{ВВДЕ}} \beta_j P_j \quad (1)$$

де α_i , β_j – частки ВНДЕ та станцій з високим вуглецевим слідом (ВВДЕ), відповідно; $P_i(t)$, $P_j(t)$ – потужність ВНДЕ та ВВДЕ, відповідно, МВт.

Оскільки електроенергія використовується в електролізері для виробництва водню, рівняння його робочої характеристики має вигляд:

$$H_{BY}(t) = \begin{cases} P_{BY}(t) \eta_{BY}, & \text{якщо } P_{BY}(t) \geq P_{BY} \\ 0, & \text{якщо } P_{BY}(t) < P_{BY} \end{cases}$$

де $H_{BY}(t)$ та $P_{BY}(t)$ – обсяг виробленого водню та обсяг електроенергії, спожитої електролізером. Ефективність роботи електролізера характеризується коефіцієнтом η_{BY} , оскільки при низьких навантаженнях ефективність різко знижується, а також існує мінімальний поріг потужності, необхідний для його роботи.

Висновки. Зелений водень є ключовим елементом декарбонізації інтегрованих енергетичних систем, забезпечуючи секторну інтеграцію, довгострокове зберігання енергії та підвищення гнучкості енергосистем із високою часткою ВЕС і СЕС. Водночас його екологічна цінність безпосередньо залежить від джерела електроенергії, використаної для електролізу. У реальних умовах роботи електричних мереж електроенергія формується як мікс перетоків потужності від різних джерел, що унеможливорює однозначне визначення її походження без урахування фізичних процесів у мережі. Тому визначення гарантованого походження електроенергії є важливим для підтвердження «зеленого» статусу водню, забезпечення прозорості сертифікації, коректного функціонування ринкових механізмів та досягнення цілей декарбонізації.

ПОСИЛАННЯ

1. IRENA (2026), Innovation landscape for sustainable development powered by renewables, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi.
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 // Відроджувана енергетика. –2024. – №2. – pp. 6–12. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2\(77\)6-12](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.2(77)6-12)

ПИТОМІ ВИТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ОПРІСНЕННЯ МОРСЬКОЇ ВОДИ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

А. О. Бриль¹, П. Ф. Васько²

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (067) 507-22-12, e-mail: A_Bryl@i.ua*

Виконано аналіз питомих витрат електроенергії на виробництво опрісненої морської води з використанням методу зворотного осмосу.

Ключові слова: електроенергія, завод, зворотній осмос, морська вода, опріснення, питомі витрати енергії, технологія.

SPECIFIC ELECTRICITY CONSUMPTION FOR SEAWATER DESALINATION BY REVERSE OSMOSIS METHOD

A. O. Bryl¹, P. F. Vasko²

*Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolozhichna Str., Kyiv, Ukraine, 03143,
phone: (067) 507-22-12, e-mail: A_Bryl@i.ua*

An analysis of the specific electricity consumption for the production of desalinated seawater using the reverse osmosis method was performed.

Keywords: electricity, plant, reverse osmosis, seawater, desalination, specific energy consumption, technology.

ORCID: 0000-0002-5134-0393¹, 0000-0001-8807-7173²

Світові обсяги виробництва опрісненої води, станом на кінець 2023 року, сягають 99 мільйонів кубічних метрів прісної води щодоби. В Європі продукується понад 9.2 мільйона кубометрів опрісненої води щодоби, тобто близько 10% загальної світової потужності. Розподіл сучасного світового ринку обсягів опріснення за технологіями наведено на рис. 1.

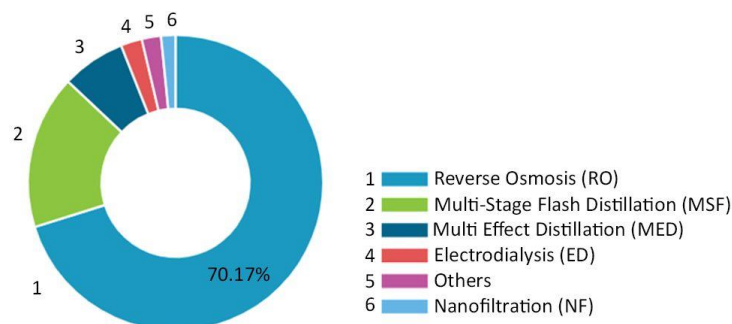


Рис.1. Сучасний світовий ринок обсягів опріснення за технологіями, 2023 [1]

Найбільше опрісненої води отримується з використанням технології зворотного осмосу (RO), яка застосовується як для солонуватої води (BWRO), так і морської (SWRO). Технологія RO [2,3,4] ґрунтується на принципі проникнення молекул води через напівпроникну мембрану під дією гідростатичного тиску, що створюється гідронасосами з приводом від електричних двигунів зі споживанням електроенергії. Мембрана відокремлює молекули води з низьким вмістом солей від основного об'єму солоної води. Для проникнення води через мембрану необхідно створити тиск, який перевищує осмотичний бар'єр, значення якого залежить від концентрації солей у живильній воді. Потрібно щонайменше 7 кПа (1 psi) на кожні 100 мг/л розчинених у воді солей. Тиск на мембрану повинен бути більшим осмотичного тиску, який для типової морської води з концентрацією солей 35 000 ppm становить близько 26 бар. З урахуванням гідравлічного опору самої мембрани необхідно створювати тиск у межах 50–70 бар. Обсяг отриманої

прісної води може досягати близько 25-30 % від початкового об'єму живильної морської води. Технологічним рішенням з наближення необхідного тиску на вході до теоретично мінімального значення осмотичного бар'єру є двостадійна схема опріснення, в якій послідовно з'єднані кілька насосів високого тиску і мембранних модулів. На першому етапі досягається лише частина загального вилучення солі, отже процес відбувається за нижчого значення прикладеного тиску. Потім концентрат з цього ступеня доводиться до більш високого тиску перед подачею на другий ступінь, де досягається додаткове вилучення. Такий режим роботи дозволяє доводити менші об'єми води до вищого тиску, тим самим споживаючи менше електроенергії, проте для цього необхідне застосування додаткових насосів, що збільшує капітальні витрати. Оскільки тиск соляного концентрату (ропи) на виході з модуля RO залишається значним, то його можна використати для відновлення частини енергії шляхом застосування пристроїв рекуперації енергії.

Затрати енергії на основних складових технологічної схеми SWRO наведено на рис.2. Переважними споживачами електроенергії є електродвигуни гідронасосів.

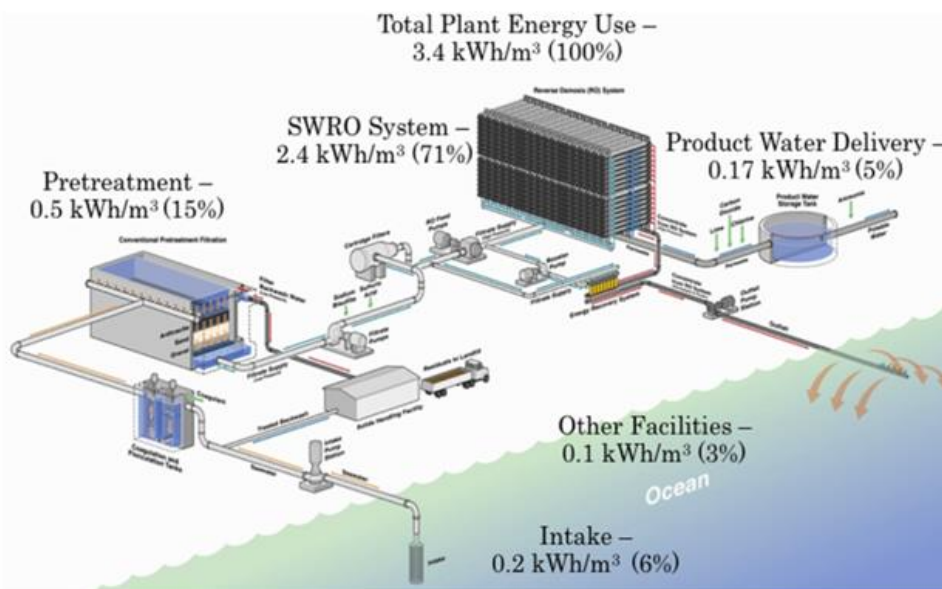


Рис.2. Затрати енергії на основних складових технологічної схеми SWRO [2]

Проте забезпечення функціонування технологічної схеми в складі заводу з опріснення води потребує додаткових затрат електроенергії на експлуатацію технології та обслуговування заводу. Осереднені авторами значення складових витрат електроенергії на функціонування заводу наведено на рис.3.

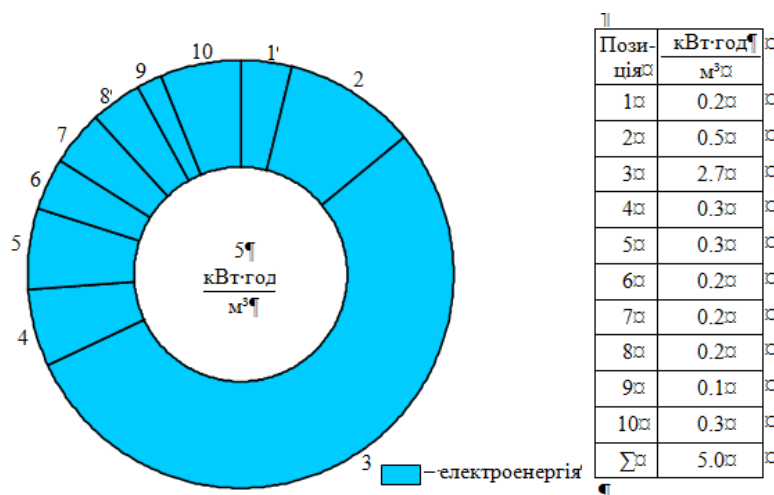


Рис.3. Діаграма енергетичних затрат на опріснення морської води з використанням технології зворотного осмосу: 1 – забір та транспортування морської води до заводу; 2 – насоси етапів підготовки морської води; 3 – насоси високого тиску технологічних ліній; 4 – насоси бустерні високого тиску; 5 – циркуляційні насоси технологічних ліній; 6 – насоси відкачування та транспортування розсолу; 7 – насоси етапу підготовки та транспортування прісної води; 8 – система керування та моніторингу; 9 – протипожежна система; 10 – система комунальних послуг заводу.

ПОСИЛАННЯ

1. 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> [Дата звернення – 21.09.2025].
2. Voutchkov N. Desalination Engineering: Planning and Design. 2019. Taylor & Francis Group, LLC. 249 P.
3. Kucera J. Reverse Osmosis. 3rd Edition. Scrivener Publishing LLC, John Wiley & Sons. 2023. 671 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.

УМОВИ СТІЙКОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ ВІТРОУСТАНОВКИ ТА НАВАНТАЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ

П. Ф. Васько¹, Б. А. Кромпляс^{1,2}

¹Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
e-mail: ivevasko@gmail.com

²Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги 56, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: b_kromp@i.ua

Розглянуто інтегральні властивості стійкого сумісного функціонування вітроустановки та навантаження за змінних значень швидкості вітру та частоти обертання. Умови стійкості навантажувального режиму в процесі експлуатації визначені на основі аналізу правої частини диференційного рівняння динаміки обертового руху вітроустановки.

Ключові слова: вітроустановка, збурення, момент, навантаження, частота обертання, швидкість вітру.

CONDITIONS FOR STABLE OPERATION OF WIND TURBINE AND LOAD OF THE WATER DESALINATION TECHNOLOGICAL SCHEME

P. F. Vasko¹, B. A. Kromplyas^{1,2}

¹Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine, 50 Metrolohična Str.,
Kyiv, Ukraine, 03143, e-mail: ivevasko@gmail.com

²Institute 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 stable combined operation of the wind turbine and the load at variable values of wind speed and rotation frequency are considered. The conditions of stability of the loading regime during operation are determined based on the analysis of the right-hand side of the differential equation of the dynamics of the rotational motion of the wind turbine.

Keywords: wind turbine, disturbance, moment, load, rotation frequency, wind speed.

ORCID: ¹0000-0001-8807-7173, ²0000-0001-7164-8056.

Потужність вітроелектричної установки (ВЕУ), призначеної для електроживлення технологічної схеми опріснення води, визначається величиною швидкості вітру, зміна якої є некерованим процесом в часі. У реальних умовах роботи наявність пульсацій швидкості вітру та комутацій навантажень викликає зміну моменту на валу ротора ВЕУ, що призводить до зміни кутової швидкості обертання і, відповідно, параметрів електроенергії, що генерується. Рівняння руху валу автономної ВЕУ при змінах у часі швидкості вітру та навантаження представимо у вигляді:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_T [V(t), \omega, \phi_a] - M_H(t, \omega), \quad (1)$$

де J - сумарний момент інерції частин, що обертаються, приведений до валу ротора ВЕУ; ω - кутова швидкість обертання ротора ВЕУ; t - поточний час; M_T - аеромеханічний момент ротора ВЕУ; V - швидкість вітру; ϕ_a - кут повороту лопатей щодо площини обертання ротора вітроустановки; $M_T [V(t), \omega, \phi_a]$ - аеромеханічна характеристика ротора вітроустановки; $M_H(t, \omega)$ - механічна характеристика навантаження.

Зміна швидкості вітру в реальному часі характеризується наявністю неперервних пульсацій, що спричиняє зміну обертового моменту на валу вітротурбіни та параметрів генерованої електроенергії. Нижче на рис. 1 наведено осцилограму зміни швидкості вітру та параметрів навантажувального режиму роботи ВЕУ на короткотривалому інтервалі часу. Так як виникнення пульсацій має імовірнісний характер, то осцилограма лише засвідчує їх наявність і відповідну реакцію ВЕУ. Для отримання статистично стійких результатів необхідно проведення тривалих експериментальних досліджень.

Таким чином, при роботі автономної ВЕУ під навантаженням наявні неперервні збурення режиму функціонування, що спричиняють до зміни швидкості обертання електромеханічної системи та моменту. За несприятливих умов

збурення можуть кардинально змінити режим функціонування поза проектні параметри. Стійка робота системи буде лише в тому випадку, коли малі збурення також спричинять малу зміну параметрів режиму функціонування.

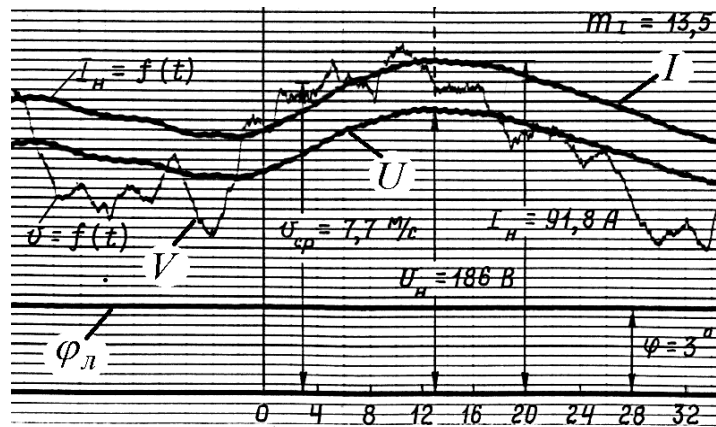


Рис.1. Осцилограма зміни швидкості вітру та параметрів навантажувального режиму роботи вітроелектричної установки на короткотривалому інтервалі часу (V - швидкість вітру; U, I - напруга та струм навантаження).

Визначимо умови стійкого функціонування автономної ВЕУ за різних значень швидкості вітру та навантаження технологічної схеми опріснення шляхом аналізу правої частини диференціального рівняння (1). Усталеному режиму роботи з частотою ω_0 відповідає точка перетину двох механічних характеристик вітротурбіни та навантаження $M_T(\omega_0) = M_H(\omega_0)$. Якщо механічні характеристики мають вид, як зображено на рис.2а, то при випадковому збільшенні частоти обертання на $\Delta\omega$ внаслідок збурення гальмівний момент навантаження стане більше моменту турбіни і система розпочне гальмуватися, а частота обертання повернеться до вихідного значення ω_0 . Якщо ж частота обертання зменшиться внаслідок збурення, то момент турбіни стане більшим моменту навантаження і система повернеться до частоти ω_0 . Таким чином, за прийнятих механічних характеристик наявність збурень зумовлює коливання параметрів навантажувальних режимів, проте система залишається в робочому стані, тобто вона стійка до збурень. Як видно з побудови механічних характеристик в даному випадку в точці усталеного режиму (M_0, ω_0) виконується умова

$$dM_T/d\omega < dM_H/d\omega, \quad (2)$$

яка і слугує критерієм стійкої роботи.

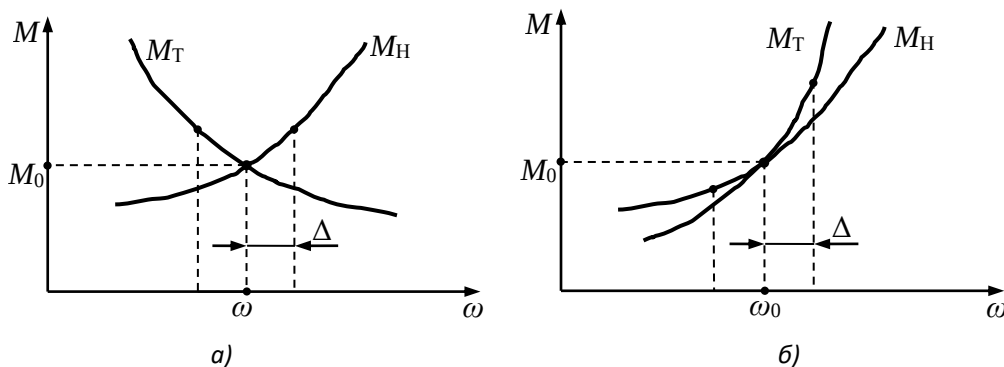


Рис.2. Стійкий (а) та нестійкий (б) режими сумісної роботи вітротурбіни та навантаження.

Розглянемо також випадок, коли механічні характеристики вітротурбіни та навантаження мають вид показаний на рис. 2б. Тепер при збільшенні частоти обертання на $\Delta\omega$ виникає надлишок обертового моменту вітротурбіни відносно навантаження і система розпочинає безперервно розганятися. Якщо ж в результаті збурень частота обертання зменшиться, то зменшиться і момент вітротурбіни відносно навантаження, а система буде безперервно гальмуватись. Тому стійка робота в точці (M_0, ω_0) неможлива. Як видно з побудови механічних характеристик на рис. 2б, в даному випадку виконується умова

$$dM_T/d\omega > dM_H/d\omega, \quad (3)$$

яка слугує критерієм нестійкої роботи системи. Ознакою нестійкої роботи може слугувати також одночасне зростання, або спадання, механічних характеристик обох складових системи.

УДК 628.165: 621.311.24: 621.313.12.025.001.1

ЗАСТУПНА ЕЛЕКТРИЧНА НЕЛІНІЙНА СХЕМА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ЗІ ЗМІННОЮ ЧАСТОТОЮ ОБЕРТАННЯ ДЛЯ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ МЕТОДОМ ЗВОРОТНОГО ОСМОСУ

П.Ф. Васько¹, В.А. Рибальченко²

Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, Київ, 03143, Україна,
тел.: (093) 033-0351, e-mail: Lemonua@gmail.com

Розроблено заступну електричну нелінійну схему синхронного генератора за змінної частоти обертання в навантажувальних автономних режимах роботи. Схема містить зустрічне з'єднання електрорушійних сил обмотки якоря від магнітних потоків збудження та реакції якоря. Нелінійність схеми зумовлена залежністю електрорушійної сили реакції якоря від струму. Розрахунок навантажувальних режимів роботи схеми потребує розв'язку нелінійного рівняння відносно струму.

Ключові слова: вітроустановка, генератор синхронний, діаграма векторна, опріснення, реакція якоря, схема електрична.

ALTERNATIVE ELECTRICAL NONLINEAR CIRCUIT OF A SYNCHRONOUS WIND TURBINE GENERATOR WITH VARIABLE SPEED FOR POWERING THE WATER DESALINATION TECHNOLOGY BY REVERSE OSMOSIS METHOD

P.F. Vasko¹, V.A. Rybalchenko²

Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolozhichna Str., Kyiv, Ukraine, 03143,
phone: (093) 033-0351, e-mail: Lemonua@gmail.com

An equivalent electrical nonlinear circuit of a synchronous generator with variable speed in load autonomous operating modes has been developed. The circuit contains a counter-connection of the electromotive forces of the armature winding from the magnetic fluxes of excitation and the armature reaction. The nonlinearity of the circuit is due to the dependence of the electromotive force of the armature reaction on the current. The calculation of the load operating modes of the circuit requires the solution of a nonlinear equation with respect to the current.

Keywords: wind turbine, synchronous generator, vector diagram, desalination, armature reaction, electrical circuit.

ORCID: 0000-0001-8807-7173¹, 0009-0009-3592-7897²

Синхронні генератори знаходять широке застосування в складі вітроелектричних установок, що працюють паралельно з централізованою електросистемою. На сьогодні набуває актуальності задача застосування потужних автономних вітроелектричних установок з синхронними генераторами для електроживлення різних технологічних схем, зокрема опріснення води методом зворотного осмосу. Розроблення раціональних схемо-технічних рішень з інтеграції енергії вітроустановок в зазначену технологію потребує аналізу навантажувальних режимів роботи всіх складових в широкому діапазоні зміни робочих швидкостей вітру і частоти обертання. Ефективне моделювання та проведення розрахункових досліджень перебігу електромеханічних процесів в даних системах може бути реалізовано шляхом застосування заступних електричних схем обладнання. Такі схеми стосовно синхронного генератора розроблені для фіктивних складових струму якоря в осях магнітної симетрії. Дане дослідження було спрямоване на розроблення еквівалентної електричної схеми СГ вітроелектричних установок в функції реального значення струму обмотки якоря в широкому діапазоні зміни частоти обертання при роботі на автономне навантаження технологічної лінії опріснення води. Розроблення схеми ґрунтувалось на основних положеннях теорії двох реакцій для синхронних машин та застосуванні методів розрахунку електричних кіл змінного струму з використанням комплексних чисел.

Отримана схема фази генератора за симетричного навантаження представлена на рис.1, до позначено: ω - кутова швидкість обертання магнітного поля відносно номінального значення, E_F - електрорушійна сила обмотки якоря від магнітного потоку збудження, E_a - електрорушійна сила обмотки якоря від магнітного потоку струму якоря, I - струм обмотки якоря, R_a - активний опір обмотки якоря, X_a - індуктивний опір розсіювання обмотки якоря, X_d та X_q - індуктивні опори реакції якоря в повздовжній та поперековій осях магнітної симетрії відповідно, β_ω - кут зсуву по фазі між електрорушійною силою та струмом, U_G - напруга на клеммах генератора.

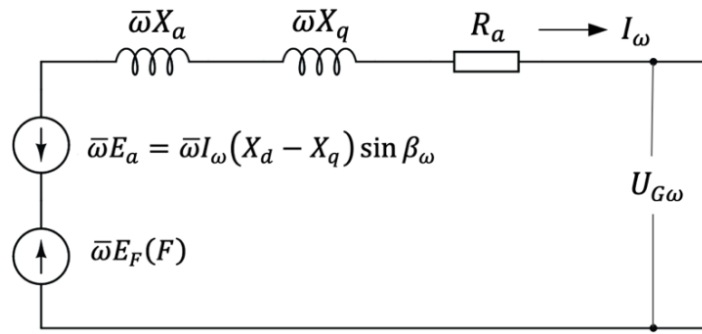


Рис.1. Заступна електрична нелінійна схема синхронного генератора

за різної частоти обертання та активно-індуктивного навантаження

Значення кута зсуву по фазі між електрорушійною силою та струмом обмотки якоря визначається з урахуванням параметрів лінії електропередачі з трансформаторними підстанціями (R_L, X_L) та обладнання технологічної лінії зворотного осмосу (R_P, X_P):

$$\beta_\omega = \arctg \frac{\bar{\omega} \cdot (X_a + X_q + X_L + X_P)}{R_a + R_L + R_P}.$$

Схема містить зустрічне з'єднання електрорушійних сил обмотки якоря від магнітних потоків збудження та реакції якоря. Нелінійність схеми зумовлена залежністю електрорушійної сили реакції якоря від струму. Тому розрахунок навантажувальних режимів роботи схеми потребує розв'язку нелінійного рівняння відносно струму одним із числових методів наближення.

Розроблена схема дозволила оцінити спроможність синхронного генератора продукувати електроенергію за зміни частоти обертання в діапазоні $0.4 \leq \bar{\omega} \leq 1.0$, характерному для вітроустановок. Параметри еквівалентної електричної схеми генератора та автономної системи електроживлення технологічної лінії представлялись наступними кількісними значеннями у відносних одиницях:

$$\dot{Z}_L + \dot{Z}_P = 0.8 + j0.6, \quad X_q = 0.6, \quad X_d = 1.0, \quad X_a = 0.1, \quad R_a = 0.025.$$

Результати числового експерименту з визначення потужності (P_G), струму та напруги генератора за різної частоти обертання представлені в графічному виді на рис.2.

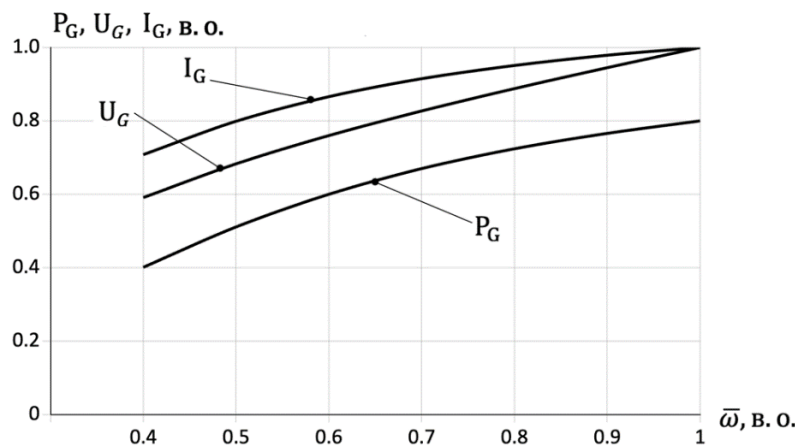


Рис.2. Залежність параметрів навантажувальних режимів генератора від частоти обертання.

При зменшенні частоти обертання в заданому діапазоні потужність генератора зменшується на 50% :

$$\Delta P_G = (P_{G(\bar{\omega}=1.0)} - P_{G(\bar{\omega}=0.4)}) \cdot 100\% / P_{G(\bar{\omega}=1.0)} = (0.8 - 0.4) \cdot 100\% / 0.8 = 50\%$$

Зменшення потужності вітротурбіни в тому ж діапазоні зміни частоти обертання складає близько 85% . Зміна потужності вітротурбіни більш інтенсивна, ніж генератора, тому генератор спроможний продукувати електроенергію в автономних навантажувальних режимах роботи зі змінною частотою обертання без обмежень потужності вітротурбіни. Генератор здатний перетворити всю механічну енергію вітротурбіни за зміни частоти обертання менше номінального значення в електричну енергію.

УДК 621.311.25

ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ МАЛИХ ГЕС ІЗ ЧАСТОТНИМ РЕГУЛЮВАННЯМ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ГІДРОАГРЕГАТУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ КОМПЛЕКСНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

О.М. Попович¹, І.В. Головань²

^{1,2}Інститут відновлюваної енергетики НАН України, вул. Метрологічна, 50, м. Київ, Україна, 03143,

^{1,2}Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги 56, м. Київ, 03057, Україна,
e-mail: popovich1955@ukr.net

Робота присвячена визначенню умов ефективного застосування частотного регулювання асинхронного генератора гідроагрегату малої ГЕС за результатами комплексного аналізу режимів ГЕС.

Ключові слова: електромеханічні системи, гідравлічні електричні станції, комплексні математичні моделі і критерії.

ENERGY EFFICIENCY OF SMALL HYDROPOWER PLANTS WITH FREQUENCY CONTROL OF THE HYDRO UNIT INDUCTION GENERATOR BASED ON COMPREHENSIVE MODELING RESULTS

O. Popovych¹, I. Golovan²

^{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

This work is devoted to determining the conditions for the effective use of frequency control of the induction generator in the hydro unit of a small hydropower plant based on the results of a comprehensive analysis of its operating modes.

Keywords: electromechanical systems, hydraulic power plants, complex mathematical models and criteria.

ORCID: ¹0000-0002-9238-5782; ²0000-0002-5250-6981.

Ефективність перетворення потенційної енергії води водосховища до електричної енергії залежить, як від умов роботи гідроагрегату, які визначаються величиною робочого напору турбіни, її швидкістю і подачею, так і від ефективності електромеханічного обладнання. Без регулювання асинхронного генератора (АГ) швидкість змінюється в межах робочого ковзання і обумовлюється частотою електричної мережі. При цьому ефективність гідротурбіни залежить від регульованої величини відкриття лопатей осьового напрямного апарату і подачі, яка визначається умовами енергетичного балансу у гідравлічній мережі турбіни. У роботі визначено резерви підвищення енергетичної ефективності ГЕС за застосування додаткового чинника – регулювання частоти електричної мережі. Ефективність ГЕС визначено за результатами комплексного моделювання, з урахуванням взаємного впливу гідротурбіни, АГ, водосховища, як співвідношення генерованої електричної енергії і витраченої води [1-3]. Дослідження виконано на прикладі гідротурбіни Пр 15/1100-5-25 [2]. Воно показало, що за сталої величини напору ефективність додаткового залучення регулювання частотою струмів суттєво залежить від оптимальності параметрів досліджуваного режиму роботи турбіни за промислової частоти. У разі такої роботи при максимумі ККД турбіни доцільність частотного регулювання мінімальна. Вона зростає з наближенням до меж області енергоефективного використання турбіни і сягає 14 %. Доцільність застосування частотного регулювання значно збільшується в режимах природного стоку, для яких характерна робота з малими напорами. При цьому, за оптимальних режимів частотного регулювання знижуються витрати, що дозволяє збільшити рівень води у водосховищі. У досліджуваному прикладі [3] зменшення частоти з 50 до 34,75 Гц супроводжується умовами балансу між витратами ГЕС і природним стоком у разі збільшення величини напору на 1 м і величини генерованої потужності на 53 %.

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 резервів підвищення енергетичної ефективності малої ГЕС за зміни частоти струмів турбоагрегату // Відновлювана енергетика. – 2025. – № 4. – С. 249-262. DOI: 10.36296/1819-8058.2025.4(83).249-262.

THERMODYNAMIC MODELING AND STOCHASTIC DEMAND ANALYSIS OF HIGH-PRESSURE HYDROGEN REFUELING FOR FCEVS BASED ON REAL GAS EFFECTS

Linfei Chen¹, Sergii Boichenko²

*National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Borshchagivska str., Kyiv, Ukraine, 03056
e-mail: chenlinfei@ntu.edu.cn*

Accurately assessing the interface thermodynamics and physical constraints of high-pressure hydrogen refueling is crucial for the operational optimization of Hydrogen Refueling Stations (HRS). Focusing on the hydrogen transfer process from the dispenser to the on-board cylinder of Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs), this paper establishes a robust thermodynamic model based on the Real Gas Equation of State (EOS). Considering the significant deviation of hydrogen from ideal gas behavior under 70 MPa conditions, the model incorporates a dynamic compressibility factor to precisely evaluate the non-isothermal density evolution. To quantify the impact of real-world traffic uncertainties, a stochastic modeling approach utilizing Monte Carlo simulation (N=1000) with a truncated normal distribution was implemented to analyze varying initial arrival states. The results reveal a profound "Thermodynamic Dampening Effect": although the arrival pressures exhibit high volatility due to traffic stochasticity (Coefficient of Variation > 30%), the actual refueling demand is strictly constrained by the "Thermal Expansion Bottleneck." At the 70 MPa cut-off limit, the elevated gas temperature (up to 340 K) severely restricts the gas density, limiting the maximum achievable State of Charge (SOC) to approximately 89.0%. Consequently, the fluctuation of the actual refueling load is dampened to below 5%. This research elucidates that the physical limitations of high-pressure transfer inherently neutralize macroscopic traffic fluctuations, providing critical theoretical foundations for establishing deterministic boundary conditions in HRS capacity planning.

Key words: Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV), High-Pressure Hydrogen Refueling, Thermodynamic Modeling, State of Charge (SOC), Thermodynamic Dampening.

ORCID: ¹0009-0009-9705-9896; ²0000-0002-2489-4980..

Abstracts of conference reports should be written in English, one or two **FULL** pages in length and should be formatted according to the given sample. File format: *.doc, *.docx.

1. Introduction

The global transition toward zero-emission transportation has significantly accelerated the deployment of Fuel Cell Electric Vehicles (FCEVs). To ensure driving ranges comparable to conventional internal combustion engine vehicles, commercial FCEVs typically employ 70 MPa Type III or Type IV on-board hydrogen storage systems. However, the high-pressure dispensing process, often referred to as "Hot Filling," introduces complex thermodynamic challenges at the interface between the Hydrogen Refueling Station (HRS) and the vehicle.

During a rapid refueling event, the hydrogen gas undergoes an isenthalpic expansion through the dispenser valve (Joule-Thomson effect) followed by significant compression work within the on-board cylinder. This coupled thermo-mechanical process leads to a rapid temperature rise inside the tank. To prevent material degradation of the cylinder, international protocols strictly limit the maximum internal gas temperature to 340 K (67°C)[1][2][3]. Under these extreme high-pressure and elevated temperature conditions, the assumption of ideal gas behavior introduces substantial estimation errors due to intense intermolecular repulsive forces[4][5].

Furthermore, the operational load of an HRS is highly stochastic. The initial pressure of FCEVs arriving at the station varies significantly depending on unpredictable traffic conditions and individual driving behaviors. Existing literature predominantly focuses either on macro-scale traffic flow forecasting[6][7] or isolated Computational Fluid Dynamics (CFD) simulations of the tank interior[8]. There remains a critical gap in quantifying how the non-linear thermodynamics of the real gas interface interact with the stochastic nature of vehicle arrivals to dampen macroscopic fluctuations.

To bridge this gap, this paper investigates the physical limitations of the 70 MPa refueling process. By establishing a Real Gas Equation of State (EOS) framework and conducting stochastic demand analysis, this study aims to reveal the underlying mechanisms of State of Charge (SOC) limitations and the thermodynamic dampening of station load variations.

2. Thermodynamic Modeling of the Refueling Interface

While macro-scale analysis addresses traffic flow, the micro-scale interface dynamics between the dispenser and the vehicle dictate the physical limitations of the refueling process. This section formulates the thermodynamic boundaries governing high-pressure hydrogen transfer.

2.1 Real Gas Density and Compressibility Behavior

For high-pressure hydrogen systems (>35 MPa), the ideal gas law fails to provide physical fidelity due to significant intermolecular repulsive forces[9][10]. To accurately evaluate the storable capacity, this study utilizes the Real Gas Equation of State expressed in terms of gas density ρ :

$$\rho(P, T) = \frac{P}{Z(P, T)RT}$$

Where P is the absolute pressure, T is the gas temperature, and R is the specific gas constant for hydrogen (4124 J/(kg·K)). The compressibility factor, Z , is introduced to quantify the non-ideal deviation. Based on high-fidelity empirical data from the NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP)[11], a polynomial correlation applicable to the 1–100 MPa operational envelope is derived:

$$Z(P, T) \approx 1 + 1.8922 \times 10^{-6} \cdot \left(\frac{P}{T}\right)$$

This equation reveals a critical physical characteristic: as the cylinder pressure approaches the 70 MPa target, the compressibility factor Z significantly exceeds 1.0 (reaching approximately 1.39 at 340 K). This indicates that the hydrogen gas is considerably less compressible than theoretical ideal gas predictions.

2.2 Formulation of Refueling Efficiency and SOC

The physical mass m stored in the onboard volume V at any given thermodynamic state is calculated as $m = \rho V$. The objective of the dispensing protocol is to maximize the final accumulated mass (m_c). However, the rapid compression inevitably forces the internal gas temperature to the 340 K safety threshold (T_c) before or exactly when the maximum cut-off pressure ($P_c = 70$ MPa) is achieved[12].

To systematically evaluate the efficiency of the refueling event, the State of Charge (SOC) is mathematically defined as the ratio of the actual filled density to the nominal density at standard reference conditions ($P_{nom} = 70$ MPa, $T_{ref} = 288$ K):

$$SOC = \frac{\rho(P_c, T_c)}{\rho(P_{nom}, T_{ref})} \times 100\%$$

This dimensionless parameter serves as the primary indicator of interface transfer effectiveness, isolating the thermodynamic constraints from the geometric volume of the specific vehicle tank.

3. Stochastic Demand Analysis and Thermodynamic Dampening

In real-world HRS operations, the arrival state of FCEVs is highly stochastic, driven by unpredictable traffic flows and individual driving distances. This section quantifies how the real-gas thermodynamic constraints interact with these macroscopic uncertainties.

3.1 Simulation Boundary Conditions and Parameters

To ensure the reproducibility and physical fidelity of the stochastic analysis, a Monte Carlo simulation ($N = 1000$) was conducted[13][14]. The geometric parameters are aligned with a standard 142.2 L Type III/IV on-board cylinder. Crucially, to prevent the generation of physically impossible negative pressures or uncharacteristically high arrival states, the initial arrival pressure (P_0) was modeled using a Truncated Normal Distribution. The boundary limits were set between 1 MPa and 12 MPa, with a distribution mean (μ) of 6.6 MPa and a standard deviation (σ) of 2.06 MPa. The key computational parameters are summarized in Table 1.

Table 1. Thermodynamic Simulation Parameters and Boundary Conditions

Parameter Description	Symbol	Value / Distribution	Unit
Monte Carlo Sample Size	N	1000	-
Specific Gas Constant for H ₂	R	4124	J/(kg·K)
On-board Tank Volume	V	0.1422	m ³
Target Cut-off Pressure	P_c	70	MPa
Target Cut-off Temperature	T_c	340	K
Initial Pressure Distribution	P_0	Truncated $\mathcal{N}(6.6, 2.06^2)$	MPa
Distribution Truncation Bounds	$[P_{min}, P_{max}]$	[1.0, 12.0]	MPa

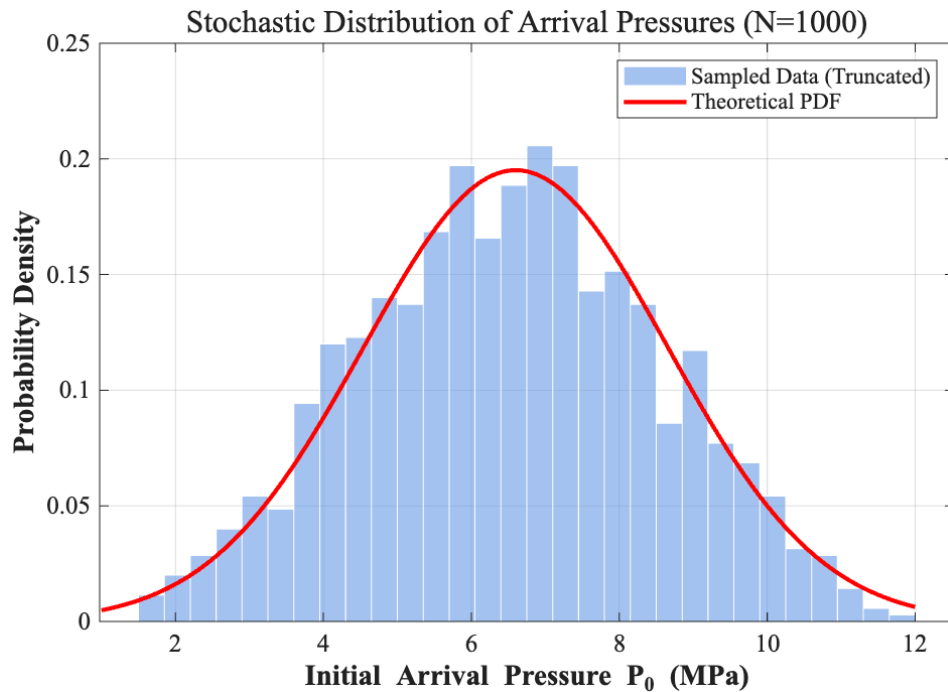


Fig. 1. Probability Distribution of Initial Arrival Pressure (P_0) for $N=1000$ Stochastic Samples.

The State of Charge (SOC) Thermal Bottleneck

A critical finding from the thermodynamic evaluation is the severe restriction on the final State of Charge (SOC) imposed by the "Hot Filling" process. As demonstrated by the Real Gas EOS calculation, at the standard reference conditions (70 MPa, 288 K), the nominal storage mass is approximately 5.60 kg.

However, the rapid compression inevitably raises the internal gas temperature to the 340 K safety threshold. To visualize this physical constraint, the relationship between the final gas temperature (T_c) and the achievable SOC is plotted in Fig. 2.

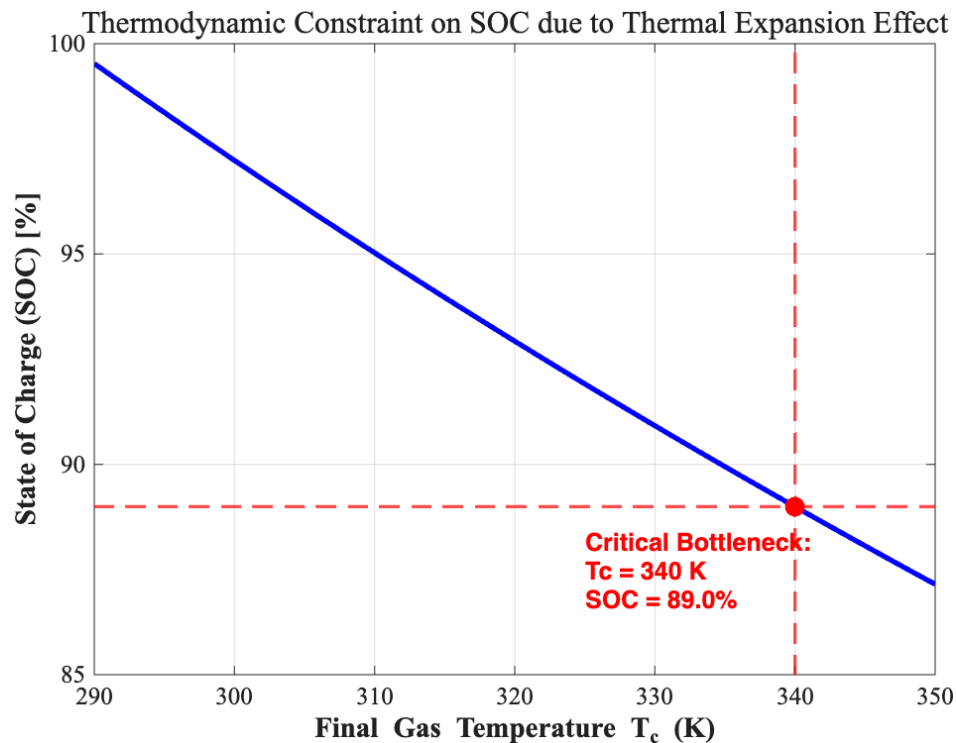


Fig. 2. Thermodynamic Constraint on SOC due to Thermal Expansion Effect.

As illustrated in Fig. 2, the elevated temperature significantly expands the real gas, reducing its density. At the critical bottleneck of 340 K and 70 MPa, the maximum physically storable mass (m_c) drops to exactly 5.00 kg. Consequently, the actual SOC is strictly capped at 89.0% [15]. This deterministic boundary proves that regardless of how empty the arriving vehicle is, the HRS can never utilize 100% of the vehicle's nominal geometric capacity due to thermal expansion.

3.2 Statistical Evidence of the Thermodynamic Dampening Effect

The combination of the SOC thermal bottleneck and the non-linear real gas compressibility leads to a phenomenon defined in this study as the Thermodynamic Dampening Effect. To quantitatively validate this effect, the statistical distributions of the input variable (Arrival Pressure P_0) and the output variable (Actual Refueling Load Δm) are compared in Table 2.

Table 2. Statistical Results of the Thermodynamic Dampening Effect

Statistical Metric	Arrival Pressure (P_0)	Actual Refueling Load (Δm)
Mean Value (μ)	6.57 MPa	4.39 kg
Standard Deviation (σ)	2.02 MPa	0.21 kg
Coefficient of Variation (CV)	30.75%	4.87%

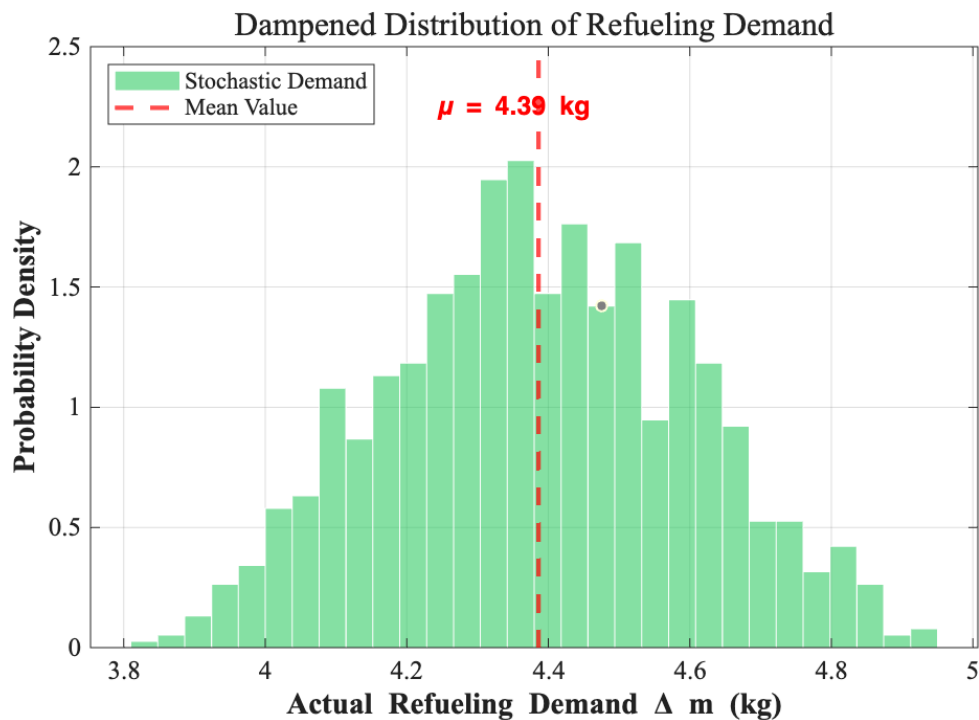


Fig. 3. Narrowed Distribution of Actual Single-Vehicle Refueling Demand (Δm).

The statistical metrics reveal a profound physical filtering mechanism. The incoming traffic states exhibit massive statistical volatility, characterized by a high Coefficient of Variation ($CV > 30\%$). However, because the final mass (m_c) is rigidly anchored near 5.00 kg by the SOC bottleneck, the fluctuation in the actual refueling demand (Δm) is severely constrained. As visualized in Fig. 3, the resulting distribution of the actual refueling demand is exceptionally narrow and stable. The high volatility of the macroscopic traffic is effectively absorbed and "squashed" by the thermodynamic constraints, resulting in a microscopic demand variation of less than 5%.

4. Conclusion

This paper presents a multi-dimensional investigation into the interface thermodynamics of 70 MPa FCEV hydrogen refueling. By integrating the Real Gas Equation of State with stochastic demand modeling, the following key conclusions are drawn:

1. **Significant Real Gas Deviation:** Under high-pressure refueling conditions, the ideal gas assumption is fundamentally invalid. The derived compressibility factor ($Z \approx 1.39$ at the cut-off state) proves that hydrogen resists compression far more severely than theoretical predictions, necessitating real-gas corrections for accurate infrastructure planning.
2. **The 89.0% SOC Bottleneck:** The non-isothermal nature of "Hot Filling" establishes a rigid physical boundary. The temperature rise to 340 K induces a thermal expansion effect that inherently caps the maximum achievable State of Charge at approximately 89.0%, underutilizing the nominal geometric capacity of on-board tanks.

3. Discovery of Thermodynamic Dampening: The study reveals that the physical limitations of high-pressure hydrogen transfer intrinsically neutralize the stochastic variations of individual vehicle arrival states. The high volatility of macroscopic traffic translates into a highly stable and constrained microscopic demand.

These findings validate the necessity of shifting the focus of HRS capacity planning from individual vehicle uncertainties to macroscopic temporal arrival rates, providing a deterministic foundation for future intelligent predictive control systems.

REFERENCES

1. Galassi, M. C., Baraldi, D., Acosta Iborra, B., & Moretto, P. (2012). CFD analysis of fast filling scenarios for 70 MPa hydrogen type IV tanks. *International Journal of Hydrogen Energy*, 37(8), 6886–6892. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.041>
2. Zheng, J., Guo, J., Yang, J., Zhao, Y., Zhao, L., Pan, X., Ma, J., & Zhang, L. (2013). Experimental and numerical study on temperature rise within a 70 MPa type III cylinder during fast refueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 38(25), 10956–10962. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.02.053>
3. Yang, J. C. (2009). A thermodynamic analysis of refueling of a hydrogen tank. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(16), 6712–6721. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.06.015>
4. Li, J., Liu, J., Zhao, B., Wang, D., Guo, S., Song, J., & Li, X. (2023). Research on Temperature Rise of Type IV Composite Hydrogen Storage Cylinders in Hydrogen Fast-Filling Process. *Energies*, 16(6), 2918. <https://doi.org/10.3390/en16062918>
5. Tatti, R., Klopčič, N., Radner, F., Zinner, C., & Trattner, A. (2026). Thermodynamic Modelling and Sensitivity Analysis of a 70 MPa Hydrogen Storage System for Heavy Duty Vehicles. *Hydrogen*, 7(1), 8. <https://doi.org/10.3390/hydrogen7010008>
6. Kurtz, J., Bradley, T., Winkler, E., & Gearhart, C. (2020). Predicting demand for hydrogen station fueling. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(56), 32298–32310. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.014>
7. Kim, J. W., Won, H. I., Park, D. Y., Kim, I. J., Lee, J. W., Kim, K. D., Noh, Y., & Jang, J. S. (2023). Study on Stochastic and Autoregressive Time Series Forecasting for Hydrogen Refueling Station. *IEEE Access*, 11, 141598–141609. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3342857>
8. Couteau, A., Alvarez, H. R., Jenny, P., & Dimopoulos Eggenschwiler, P. (2025). Thermal and heat transfer dynamics in high pressure, high aspect ratio hydrogen tank filling processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 194, 152513. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.152513>
9. Xiao, J., Ma, S., Wang, X., Deng, S., Yang, T., & Bénard, P. (2019). Effect of Hydrogen Refueling Parameters on Final State of Charge. *Energies*, 12(4), 645. <https://doi.org/10.3390/en12040645>
10. Xiao, J., Ma, S., Wang, X., Deng, S., Yang, T., & Bénard, P. (2019). Effect of Hydrogen Refueling Parameters on Final State of Charge. *Energies*, 12(4), 645. <https://doi.org/10.3390/en17051130>
11. Lemmon, E.W., Bell, I.H., Huber, M.L., McLinden, M.O. NIST Standard Reference Database 23: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties-REFPROP, Version 10.0, National Institute of Standards and Technology, Standard Reference Data Program, Gaithersburg, 2018.
12. Reddi, K., Elgowainy, A., Rustagi, N., & Gupta, E. (2017). Impact of hydrogen SAE J2601 fueling methods on fueling time of light-duty fuel cell electric vehicles. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(26), 16675–16685. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.233>
13. Gholami, K., Arif, M. T., & Haque, M. E. (2025). Machine learning-driven stochastic bidding for hydrogen Refueling Station-integrated virtual power plants in energy market. *Journal of Energy Storage*, 134, 117946. <https://doi.org/10.1016/j.est.2025.117946>
14. Tian, X., Yang, H., Ge, Y., & Yuan, T. (2024). Site Selection and Capacity Determination of Electric Hydrogen Charging Integrated Station Based on Voronoi Diagram and Particle Swarm Algorithm. *Energies*, 17(2), 418. <https://doi.org/10.3390/en17020418>
15. Suvar, M. C., Simon-Marínica, A. B., Vass, Z., & Pasculescu, A. C. (2025). Probabilistic risk assessment of a hydrogen refuelling station explosion in a semi-urban environment using Monte Carlo simulation. *MATEC Web of Conferences*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202541800042>

УДК 624.482

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФРОНТУ У ВОДОНОСНОМУ ГОРИЗОНТІ

А. А. Барило¹, А. Сорока², І. В. Лобанова³

Інститут відновлюваної енергетики НАН України
102094, м. Київ, вул. Г.Хоткевича, 20А,
тел./факс 206-28-09, e-mail: geotherm@ukr.net

Робота присвячена обґрунтуванню методичних підходів до експериментального визначення швидкості руху температурного фронту у водоносному горизонті як ключового параметра ефективності систем акумулювання теплової енергії. Розглянуто фізичну сутність цього показника, чинники його формування та зв'язок із теплоакумулюючими властивостями водоносних горизонтів. Запропоновано схему та основні параметри проведення теплового трасерного випробування.

Ключові слова: водоносний горизонт, акумулювання теплоти, швидкість руху температурного фронту

METHODOLOGICAL ASPECTS OF THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE TEMPERATURE FRONT PROPAGATION VELOCITY IN AN AQUIFER

A. Barylo¹, A. Soroka², I. Lobanova³

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

The paper is devoted to substantiating methodological approaches to the experimental determination of the temperature front propagation velocity in an aquifer as a key parameter of the efficiency of thermal energy storage systems. The physical meaning of this parameter, the factors governing its formation, and its relationship with the heat storage properties of aquifers are considered. A testing scheme and the main parameters of a thermal tracer experiment are proposed.

Keywords: liquidated oil and gas wells, geothermal wells, well requirements

¹наук. співроб. <https://orcid.org/0000-0001-7981-64642>

²пров. інж. <https://orcid.org/0009-0007-0388-57043>

³мол. наук. співроб. <https://orcid.org/0009-0007-0625-8052>

Зростання частки відновлюваних джерел енергії в Україні зумовлює актуальність задач ефективного акумулювання надлишкової теплоти, що утворюється за умов нерівномірного теплового навантаження. Одним із перспективних рішень є сезонне зберігання теплової енергії у водоносних горизонтах [1].

Акумулювання теплоти у водоносних горизонтах має низку суттєвих переваг: високу теплоємність природного середовища, можливість зберігання значних об'ємів енергії без спорудження поверхневих акумулюючих об'єктів, а також відносно низькі капітальні й експлуатаційні витрати. Такі системи характеризуються тривалим терміном експлуатації та можуть інтегруватися з сонячними колекторами, тепловими насосами та іншими джерелами низькопотенційної теплоти.

У світовій практиці такі системи широко застосовуються в країнах Західної та Північної Європи, де використовуються для сезонного акумулювання теплоти й холоду в системах теплопостачання громадських і промислових будівель [2,3]. В Україні інтерес до використання теплового потенціалу підземних вод поступово зростає, що підтверджується дослідженнями теплового режиму водоносних горизонтів і можливостей їх енергетичного використання.

Ключовим параметром, який визначає ефективність застосування системи акумулювання теплової енергії у водоносному горизонті, є швидкість руху температурного фронту. Швидкість руху температурного фронту — це ефективна швидкість поширення зони підвищеної (або зниженої) температури у водоносному горизонті внаслідок спільної дії фільтраційного переносу теплоти підземними водами та теплового обміну з породами-колекторами [4].

Швидкість руху температурного фронту завжди менша за швидкість фільтрації води у водоносному горизонті та характеризує інерційність теплового процесу, зумовлену акумулюванням теплоти породами водоносного горизонту. Чим менша пористість і більша теплоємність скелету порід - тим повільніша швидкість руху температурного фронту і кращі умови для збереження теплоти у горизонті.

Швидкість руху температурного фронту формується під дією наступних чинників:

гідродинамічних: швидкість фільтрації підземних вод, величина гідравлічного градієнта, режим закачування (дебіт, сталість дебіту);

фільтраційно-колекторських властивостей горизонту: пористість, проникність, неоднорідність і шаруватість горизонту, наявність зон підвищеної проникності;

теплофізичних властивостей: теплоємність води та породи, теплопровідність скелету порід, ступінь теплової дисперсії, інтенсивність теплообміну між водою та породами;

геометричних та експлуатаційних умов: відстань між свердловинами, конфігурація зони закачування, тривалість і температура закачування.

Швидкість руху температурного фронту визначає умови збереження теплоти в пласті, просторові межі теплової аномалії, ймовірність теплового прориву (контакту зони теплової аномалії із зоною закачування холодного відпрацьованого теплоносія) та параметри можливого зворотного вилучення теплової енергії.

Зазвичай швидкість руху температурного фронту визначають експериментально, шляхом проведення теплового трасерного випробування водоносного горизонту [5-7].

Для проведення теплового трасерного випробування використовується пара свердловин, розташованих за напрямом фільтраційного потоку у горизонті, та Блок підготовки теплоносія для випробування. Схема експерименту наведена на рис. 1.

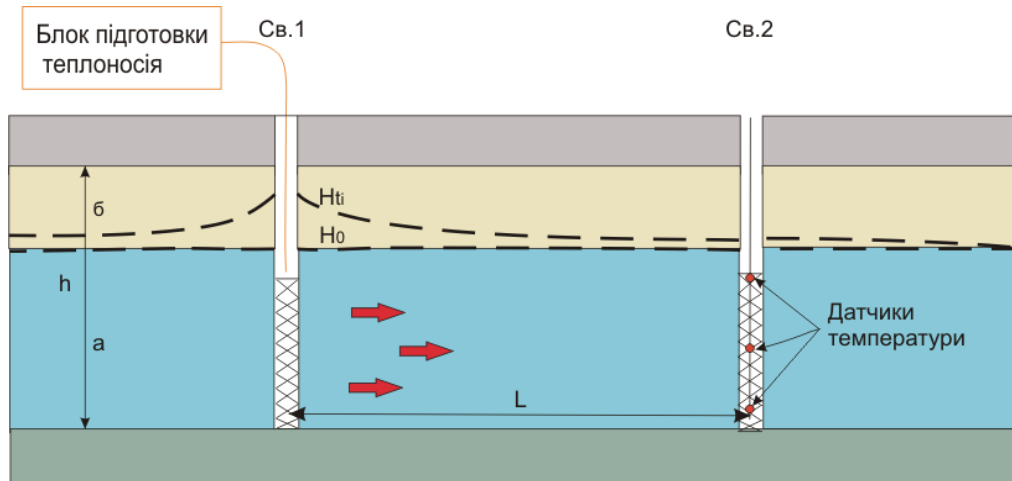


Рисунок 1. Схема теплового трасерного випробування водоносного горизонту:

h – товщина водоносного горизонту (a – насичена водою частина; $б$ – «суха» частина; H_0 – початковий рівень; H_{t_i} – рівень на t_i час закачування; L – відстань між свердловинами

Блок підготовки теплоносія включає: джерело теплоносія, нагрівальний блок, насос для подачі теплоносія у нагнітальну свердловину, систему контролю та регулювання, змішувальний вузол (за потреби) та систему обліку та реєстрації даних.

У нагнітальну свердловину (1) закачується теплоносій з підвищеною температурою, який виконує роль теплового трасера. Закачування здійснюється при сталому дебіті до стабілізації температури у спостережній свердловині. Допустимий інтервал коливання дебіту $\pm 5 - 10 \%$.

Спостережна свердловина (2), розміщена нижче за напрямом фільтраційного потоку, обладнується датчиками температури, що забезпечують безперервну реєстрацію температури підземних вод. У разі використання одного

датчика його розміщують у середині активної товщини водоносного горизонту. Застосування кількох датчиків дозволяє врахувати вертикальну неоднорідність теплопереносу та підвищує достовірність інтерпретації результатів теплового трасерного випробування.

За результатами спостережень визначають момент приходу теплової аномалії до спостережної свердловини (t), характер зміни температури в часі та максимальне підвищення температури (T_{max}).

Перед початком експерименту визначають відстань між нагнітальною та спостережною свердловинами (L) і фонову температуру підземних вод з урахуванням амплітуди її природних сезонних коливань (T_0).

Відстань між нагнітальною та спостережною свердловинами має забезпечувати чітку реєстрацію температурного фронту. За малої відстані між свердловинами переважає фільтраційний перенос теплоти, унаслідок чого отримані значення швидкості руху температурного фронту можуть бути завищеними, оскільки породи водоносного горизонту не встигають акумулювати теплоту. Рекомендована відстань між нагнітальною та спостережною свердловинами становить 10–30 м.

Температура теплоносія, що закачується, повинна бути сталою та перевищувати природну температуру підземних вод на 5–10 °С, що забезпечує надійну реєстрацію теплової аномалії без істотного порушення природного фільтраційного та теплового режимів водоносного горизонту (наприклад, зміни в'язкості води із змінами температури). Для короткострокових випробувань допустимий перепад температури дорівнює 10–15 °С.

Середня швидкість руху температурного фронту визначається за формулою:

$$v_{m.ф.} = \frac{L}{t} ;$$

де: $v_{m.ф.}$ – середня швидкість руху температурного фронту, м/час;

L – відстань між свердловинами, м; t – час надходження теплової аномалії до спостережної свердловини, час.

Звернемо увагу, що теплове трасерне випробування доцільно проводити у безперервному режимі із сталим дебітом закачування. За таких умов отримуються параметри теплопереносу, віднесені до одиниці дебіту, які можуть бути використані для орієнтовної оцінки роботи системи за інших значень дебіту, а також за допомогою метода суперпозиції можливо проводити розрахунки для змінного режиму закачування.

Як зазначалося вище, випробування виконують до моменту стабілізації температури у спостережній свердловині. Водночас сам процес зміни та стабілізації температури є інформативним і має важливе діагностичне значення. Його характер ілюструє термограма, наведена на рис. 2.

На рис. 2 синім кольором позначено горизонт, що має придатні властивості для акумулювання теплової енергії, червоним – горизонт, що характеризується слабкою теплоакумулюючою здатністю.

Як видно з термограм, для водоносного горизонту зі слабкою теплоакумулюючою здатністю характерним є різкий підйом температури до максимального значення, короткочасне утримання піка та подальше швидке зниження температури. Натомість для горизонту з високою теплоакумулюючою здатністю процес характеризується тривалішим періодом стабілізації, плавним зростанням температури, утриманням пікових значень і поступовим зменшенням температури у часі.

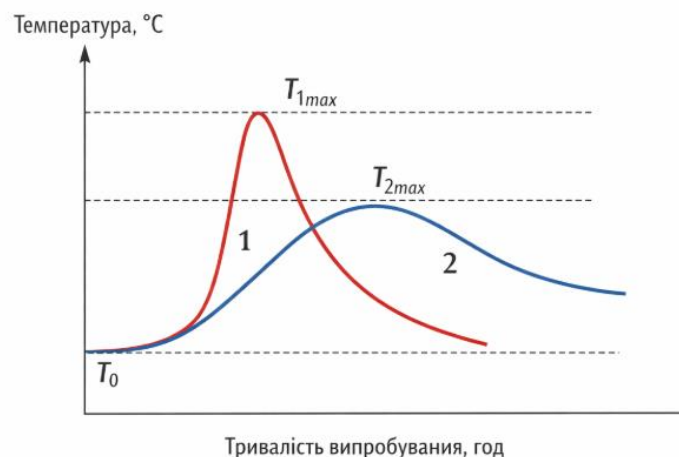


Рисунок 2. – Типові термограми стабілізації температури у спостережній свердловині

На завершення зауважимо, що на сьогодні в Україні відсутня офіційно затверджена методика проведення експериментального визначення швидкості руху температурного фронту у водоносному горизонті з використанням теплового трасерного випробування. Окремі елементи такої методики наведені у підручниках з гідрогеології та в методичних рекомендаціях щодо виконання дослідно-фільтраційних робіт [8]. Більш детально ці питання висвітлені у закордонних нормативних документах та наукових публікаціях [9-11]. У зв'язку зі зростаючою зацікавленістю у використанні теплового потенціалу верхніх водоносних горизонтів в Україні актуальним є розроблення відповідного нормативно-методичного документа.

ПОСИЛАННЯ

1. Про затвердження Національного плану дій з відновлюваної енергетики на період до 2030 року та плану заходів з його виконання Розпорядження Каб. Мін. України №761-р від 13.08.2024.
2. <https://www.kmu.gov.ua/news/uriad-zatverdyyv-natsionalnyi-plan-dii-z-vidnovliuvanoi-enerhetyky-na-period-do-2030-roku-premier-ministr>
3. Fleuchaus P. Global application, performance and risk analysis of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). Dissertation. Karlsruhe. 2020.
4. IRENA. Renewable Energy Statistics 2019. // <https://www.irena.org/publications/2018/Mar/Renewable-Capacity-Statistics-2019>
5. Морозов Ю. П. Видобування геотермальної енергії : монографія. /ІВЕ НАН України/. – Київ. ІВЕ НАН України, 2022. – 245 с. – (Обл.-вид. арк. 7,0). – ISBN 978-966- 641-12. URL : https://www.ive.org.ua/wp-content/uploads/Morozov_Monografy_Site.pdf
6. Корнєєнко С.В. Методика гідрогеологічних досліджень: підручник. Київський національний університет імені Тараса Шевченка. 2015– 275 с. <http://www.geol.univ.kiev.ua/lib/MHGR-2015.pdf>
7. Мироненко В.А., Шестаков В.М. Теория и методы интерпретации опытно-фильтрационных работ. М.: Недра, 1978. - 325 с.
8. Рудаков Д.В. Моделирование теплопереноса в водоносном горизонте при аккумуляции и отборе тепловой энергии // Д.В. Рудаков, И.А. Садовенко, А.В. Инкин, З.Н. Якубовская // Науковий вісник НГУ. – 2012. – № 1. – С. 40-45.
9. МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ щодо змісту, оформлення та порядку подання до Державної комісії України по запасах корисних копалин матеріалів геолого-економічної оцінки родовищ промислових підземних вод Наказ ДКЗ України 30.12.2011 № 760
10. ISO 14686:2003 — Pumping tests for water wells — Hydrometric determinations — Pumping tests for water wells — Considerations and guidelines for design, performance and use. <https://www.iso.org/standard/20977.html>
11. Kovalevsky Vlademir S., Kruseman Gideon P., Rushton Ken R. Groundwater studies: an international guide for hydrogeological investigations. 2004 <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000134432>
12. Dickinson JS, Buik N, Matthews MC, and Snijders A (2009) Aquifer thermal energy storage: Theoretical and operational analysis. Géotechnique 59.3, 249–260. doi: 10.1 680/geot.2009.59.3.249.

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ НАДДОВГИХ ГРАВІТАЦІЙНИХ ТЕПЛОВИХ ТРУБ ДЛЯ ВИДОБУТКУ ГЕОТЕРМАЛЬНОЇ ЕНЕРГІЇ

Ю. П. Морозов¹, В. Г. Олійніченко¹, Д. М. Чалаєв^{1,2}

¹ Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Гната Хоткевича, 20А, м. Київ, 02094, Україна,
тел. +38 044 206 28 09, e-mail: geotherm@ukr.net

² Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Булаховського, 2, м. Київ, 03164, Україна

Представлений аналіз сучасного стану застосування технології наддовгих гравітаційних теплових труб для видобутку геотермальної енергії та результати випробування експериментального зразка теплової труби.

Ключові слова: геотермальна енергія, свердловина, гравітаційна тепла труба, термосифон, холодоагент, випаровування, конденсація, тепловий насос.

ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF USING SUPER-LONG GRAVITY HEAT PIPES FOR GEOTHERMAL ENERGY EXTRACTION

Yu. P. Morozov¹, V. G. Olynichenko¹, D. M. Chalaev^{1,2}

¹ Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine, 20A Hnata Khotkevycha str., Kyiv, 02094, Ukraine,

² Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, 2 Bulahovskoho str., Kyiv, 03164, Ukraine

An analysis of the current state of the art in the application of super-long gravity heat pipe technology for geothermal energy extraction and the results of testing an experimental heat pipe prototype are presented.

Key words: geothermal energy, well, gravity heat pipe, thermosiphon, refrigerant, evaporation, condensation, heat pump.

ORCID: 0000-0003-1632-9735; 0000-0003-4651-9628; 0000-0002-5154-4257.

Геотермальні ресурси є одним з найбільш конкурентоспроможних відновлюваних джерел енергії завдяки своїм численним перевагам, включаючи рясні запаси, широку доступність, виняткову стабільність і високу ефективність. Незважаючи на властиву їй стабільність і надійність у порівнянні з іншими відновлюваними джерелами енергії, геотермальна енергія розвивалася відносно повільно, що пояснюється високими початковими інвестиційними витратами та низьким прогресом у технологіях її вилучення. Тому розробка економічно ефективних та екологічно чистих технологій видобутку теплової енергії із глибоких геотермальних резервуарів має важливе значення для прискорення великомасштабного комерційного використання геотермальної енергії.

У зв'язку з цим останніми роками значну увагу почали приділяти дослідженням, присвяченим розробці та вдосконаленню технології вилучення глибинної геотермальної енергії за допомогою наддовгих гравітаційних теплових труб. У 2021 році було запропоновано інноваційну технічну схему геотермальної системи з наддовгою гравітаційною тепловою трубою довжиною 3000 м [1]. Такі системи дозволяють видобувати підземне тепло без необхідності видобутку геотермального флюїду. У 2024 р. W. Huang та ін. [2] опублікували результати випробувань побудованої в районі Сюнань, провінція Хебей (Китай) геотермальної системи з наддовгою гравітаційною тепловою трубою. Теплова труба має довжину 4149 м і на сьогодні є найдовшою з коли-небудь встановлених у геотермальній свердловині. Як робоча рідина використовувався аміак. Геотермальна система може безперервно виробляти більше 1 МВт тепла, а тепловий потік через радіальний поперечний переріз теплової труби становить 4×10^7 Вт/м², що свідчить про виняткову здатність теплопередачі розробленої наддовгої гравітаційної теплової труби.

Звичайні теплові труби та методи їх розрахунку досить вивчені, проте унікальна геометрична структура наддовгої гравітаційної теплової труби, з її великим відношенням довжини до діаметра, що значно перевершує такі у звичайних теплових трубах, може призвести до різних режимів роботи та характеристик теплопередачі. Аналіз літератур-

них джерел показує, що існують прогалини у методах розрахунку теплових труб великої довжини. Це вимагає подальшого дослідження їх експлуатаційних характеристик та накопичення даних, які можуть бути практично використані для проектування та розробки такого роду геотермальних теплових труб.

В геотермальних термосифонних теплових трубах як робоче тіло перспективно використовувати теплоносії з високим тиском насичення та більшою густиною пари. З відомих холодильних агентів з екологічної точки зору в першу чергу представляють інтерес так звані «природні» речовини – етан (R-170), пропан (R-290), ізобутан (R-600a), аміак (R-717), двоокис вуглецю (R-744). За фізичними властивостями одним із найбільш відповідних робочих тіл для геотермальних термосифонів є аміак (R-717) і двоокис вуглецю (R-744), що мають значно більшу об'ємну холодильну продуктивність у порівнянні з іншими холодильними агентами, що приводить до невеликої масової витрати в термосифоні [3, 4].

Ефективність роботи гравітаційної теплової труби з великою довжиною випарної зони значною мірою залежить від повноти змочування поверхні випарної зони плівкою рідкого агента. Режим стікання плівки конденсату залежить, у свою чергу, від конструкції теплової труби, довжини та шорсткості внутрішньої поверхні. У теплових трубах великої довжини для забезпечення рівномірного змочування стінки випарної зони зазвичай встановлюють пористий гніт, однак для геотермальних зондів, що мають велику довжину, це рішення не може бути застосовано. Використання ж звичайних жорстких сталевих труб також є відносно складним і дорогим, тому що в цьому випадку тепла труба повинна збиратися та заправлятися агентом на місці експлуатації із проведенням відповідного контролю герметичності з'єднань.

В теплових трубах великої довжини ефективним рішенням є використання гнучких труб з гофрованою поверхнею. Готова тепла труба необхідної довжини може доставлятися в згорнутому вигляді на місце монтажу та безпосередньо з обмотки вводиться в канал стовпа свердловини.

В Україні налагоджено промислове виробництво подібних гофрованих нержавіючих труб з кільцевою та гвинтовою накаткою гофри. Нами досліджено можливість використання таких труб для виготовлення глибинних геотермальних термосифонних зондів.

Експериментальний зразок теплової труби виготовлений із гнучкої гофрованої труби з нержавіючої сталі з гвинтовою накаткою гофр. Як робочий агент використаний фреон R-22. Труба має товщину стінки 0,3 мм, діаметр 20 мм і довжину 15 м, що імітує основні геометричні характеристики наддовгих теплових труб, які можуть бути використані для вилучення геотермального тепла.

Випробування експериментальної теплової труби показали, що в зоні випаровування труби, за рахунок стікання конденсату по гвинтовій канавці, відбувається практично повне змочування стінки. Це забезпечує рівномірний розподіл робочого агента по поверхні труби та ефективне перенесення тепла, що підтверджується рівномірністю температурного поля по всій довжині випарної зони теплової труби.

Висновки. Розрахункові та експериментальні дослідження показують, що наддовга гравітаційна тепла труба є ефективним засобом для видобутку геотермального тепла і може передавати тепловий потік на великі відстані практично без втрат.

ПОСИЛАННЯ

34. R.S. Anand, A. Li, W. Huang, J. Chen, Z. Li, Q. Ma, F. Jiang. Super-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 193, (2024), 114286.
35. W. Huang, J. Chen, Q. Ma, L. Xing, G. Wang, J. Cen, Z. Li, A. Li, F. Jiang. Developing kilometers-long gravity heat pipe for geothermal energy exploitation. *Energy Environ. Sci.*, 2024, 17, 4508.
36. Морозов Ю. П., Чалаєв Д. М., Величко В. В. Вилучення геотермальної теплоти за допомогою теплових труб. Наукові праці ОНАХТ.– 2017. – Т. 81. – Вип. 1. – С. 23-27.
37. Морозов Ю.П., Чалаєв Д.М., Величко В.В. Децентрализованное теплоснабжение с помощью геотермальных тепловых насосов. Альтернативная энергетика и экология (ISJAEE). 2017;(4-6):70–79.

ПЕРСПЕКТИВНІ ГЕОТЕРМАЛЬНІ СИСТЕМИ

В. Ю. Скосар¹

*Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України,
вул. Писаржевського, 5, м.Дніпро, 49005, Україна,
тел.: (066) 731-86-18, e-mail: skosarslava@gmail.com*

Проведено аналіз стану геотермальних технологій, зокрема, Enhanced geothermal systems (EGS). Вказані недоліки традиційних геотермальних станцій, а також переваги і недоліки EGS. Традиційні геотермальні технології, на жаль, чутливі до місцевих геологічних умов: необхідна висока теплова активність; можливість ефективного повернення відпрацьованого теплоносія. Такі умови в Україні не дуже поширені. EGS обіцяють ефективне використання геотермальної енергії без просторових обмежень звичайних геотермальних систем. Але, існують проблеми, які впливають на життєздатність проєктів EGS: проблема збереження циркуляції та цілісності бурового розчину; проблема виходу з ладу обладнання при високих температурах. Незважаючи на технічні і фінансові труднощі, розробка та вдосконалення EGS є світовим трендом.

Ключові слова: *екологічна криза, традиційні геотермальні станції, удосконалені геотермальні системи, перспективні регіони для буріння свердловин для створення геотермальних систем EGS.*

PROSPECTIVE GEOTHERMAL SYSTEMS

V. Yu. Skosar¹

*²Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine,
5 Pisarzhevskiy str., Dnipro, 49005, Ukraine,
phone: (066) 731-86-18, e-mail: skosarslava@gmail.com*

An analysis of the state of geothermal technologies was carried out, in particular, Enhanced geothermal systems (EGS). The disadvantages of traditional geothermal stations are indicated, as well as the advantages and disadvantages of EGS. Traditional geothermal technologies are unfortunately sensitive to local geological conditions: high thermal activity is required; the possibility of effective return of the spent coolant. Such conditions are not very common in Ukraine. EGS promise efficient use of geothermal energy without the spatial limitations of conventional geothermal systems. However, there are issues that affect the viability of EGS projects: the problem of maintaining the circulation and integrity of the drilling fluid; the problem of equipment failure at high temperatures. Despite technical and financial difficulties, the development and improvement of EGS is a global trend.

Key words: *ecological crisis, traditional geothermal stations, Enhanced geothermal systems, promising regions for drilling wells to create geothermal systems EGS.*

ORCID: [10000-0002-2151-3417](https://orcid.org/10000-0002-2151-3417).

Останні дослідження стверджують, що згідно нової моделі кліматичної системи Землі, якщо глобальне потепління перевищить головну мету Паризької угоди (не більш 1,5 °C), це може призвести до небезпечного перелому, після якого, ймовірно буде неможливо повернутися. Досягнення нульових викидів парникових газів до 2100 р. суттєво зменшує ризик катастрофічних наслідків [1, 2]. Тому слід прискорити впровадження заходів щодо зниження викидів парникових газів. Одним із шляхів досягнення зазначеної мети є розвиток геотермальної енергетики [3, 4].

В Україні на континентальній частині добре відомі регіони з підвищеним тепловим потоком, які є перспективними для геотермальної енергетики [3-6]. Згідно вказаним джерелам найбільш високі температури гірських порід (на глибині 5 км) слід очікувати у Закарпатському прогині та вздовж узбережжя Чорного та Азовського морів. Помірно високі температури (на глибині 5 км) слід очікувати на Південному краї Українського щита, у Дніпровсько-Донецької западині, на більшій частині Волино-Подільської плити (окрім північної частини). На жаль, сьогодні геотермальна енергетика вважається недостатньо розвинутою енергетичною технологією, як у світі, так і в Україні [7]. Це

пов'язано з чутливістю традиційної геотермальної технології до місцевих геологічних умов: необхідна висока теплова активність; можливість ефективного повернення відпрацьованого теплоносія та виконання інших умов, які в Україні не дуже поширені [5, 8-10]. Наприклад, для традиційних геотермальних систем актуальною залишається проблема повернення відпрацьованого теплоносія. Відпрацьований теплоносій частково охолоджує продуктивний пласт, тобто знижує температуру гарячого теплоносія, що видобувається. Крім того, у багатьох випадках тиск нагнітання відпрацьованого теплоносія у продуктивний пласт дуже великий, а енергетичні витрати на зворотне закачування становляться невиправданими. Також існують вимоги, яким не завжди можна задовольнити: вище розташований водоносний горизонт, куди можна закачувати відпрацьований теплоносій, не повинен використовуватися для технічного, тем більш, для питного водопостачання; водоносний горизонт має бути ізольований від ще вище розташованих водоносних горизонтів і поверхневих водойм; поглинальна здатність водоносного горизонту повинна бути достатньою для зворотного закачування; хімічний склад відпрацьованого теплоносія повинен бути сумісним з хімічним складом водоносного горизонту задля запобігання солевідкладення; інші вимоги [10]. Тому видобуток енергії з гарячої сухої породи з використанням «удосконалених геотермальних систем» (Enhanced geothermal systems – EGS) обіцяє ефективне використання геотермальної енергії без просторових обмежень звичайних геотермальних систем.

На відміну від традиційних геотермальних станцій суть EGS полягає в тому, що вони потребують створення штучних резервуарів в надрах, як правило, із застосуванням гідравлічної стимуляції (методом гідророзриву). При цьому EGS охоплюють широкий спектр типів порід, глибини, температури, проникності та пористості колектора, а також тип використовуваної техніки стимуляції. EGS спрямовані на використання тепла великих глибин [11]. Наприклад, в публікаціях [12-13] приведено опис EGS, яка має наступну перевагу: вона не вимагає гідророзриву в надрах. Замість цього (рис. 1) використовується система «замкнутого циклу» (Eavor-Loop). До складу системи входять дві вертикальні свердловини-трубки (BC і DE) і декілька горизонтальних свердловин-трубок (CD). Теплоносій циркулює таким чином, як вказано на рис. 1, витягуючи тепло з надр, де розташовані горизонтальні труби, і доставляючи тепло до геотермальної станції на поверхні. Перший варіант системи вже продемонстрував ефективність нової технології (для глибини 2,4 км). З грудня 2025 р. перший комерційний геотермальний проект замкнутого циклу Eavor-Loop в Геретсриді (Німеччина) почав постачати електроенергію в мережу [14].

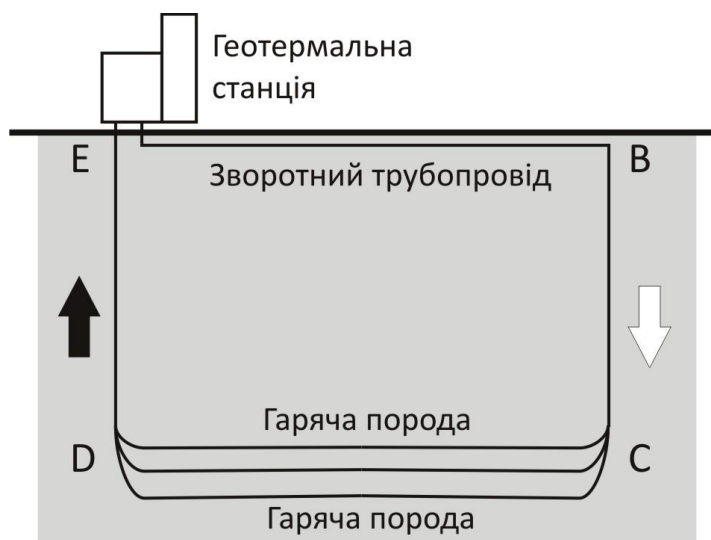


Рис.1. Схема варіанту удосконаленої геотермальної системи, згідно [13]

В більшості регіонів, де температура в глибині вище 150°C (глибина більше 3-5 км), пористість порід недостатня для розміщення значних об'ємів рідини, тому необхідно підвищити пористість і проникність шляхом гідророзриву пласта. Після стимулювання певного об'єму породи в зоні пробурюють експлуатаційні свердловини. Гідророзрив пласта зазвичай посилює існуючі тріщини. Відстежуючи мікросейсмічні події, що відбуваються під час перфорації, можна оцінити форму та розташування тріщин, щоб нагнітальні свердловини можна було пробурити в найбільш проникних зонах. Рідина для гідророзриву пласта складається з води та штучних пропантів, таких як пісок та інші матеріали вибраного розміру та твердості, основним завданням яких є утримання тріщин після їх створення. Вилучення тепла з корінних порід здійснюється шляхом закачування теплоносія через нагнітальну свердловину і отримання гарячого теплоносія з видобувної свердловини (рис. 2) [11]. На рис. 2 позначено: 1 – резервуар; 2 – насосна станція; 3 – теплообмінник; 4 – машинний зал; 5 – видобувна свердловина; 6 – нагнітальна свердловина; 7 – гаряча вода для централізованого тепlopостачання; 8 – пористі відкладення; 9 – оглядова свердловина; 10 – кристалічна корінна порода; 11 – вода з річки.

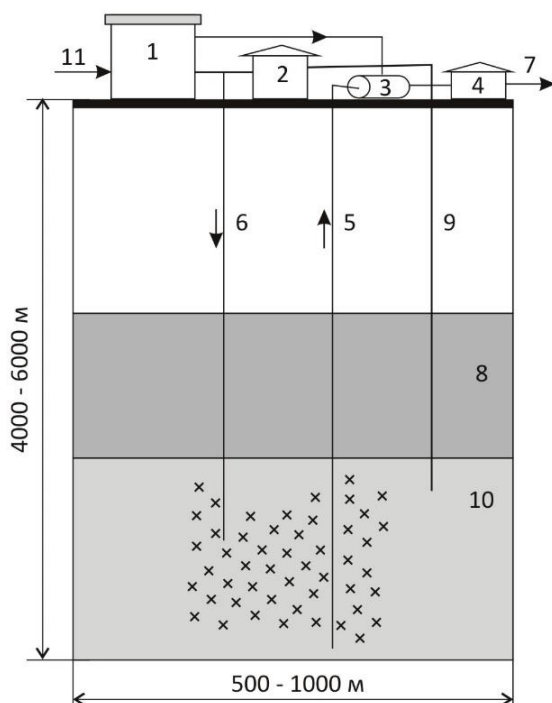


Рис. 2. Схема варіанту удосконаленої геотермальної системи, згідно [11]

Світовий досвід вказує, що розробка та експлуатація EGS потребує постійного вдосконалення технології глибокого та надглибокого буріння, а також науково-технічних зусиль щодо вдосконалення власне самих EGS. Існують проблеми, які впливають на життєздатність проектів EGS. По-перше, це проблема збереження циркуляції та цілісності бурового розчину. В деяких випадках буровий розчин вбирається в зони високої проникності. Крім того, розклинювальні наповнювачі можуть втрачати в'язкість при підвищених температурах. По-друге, це проблема виходу з ладу обладнання при високих температурах [11]. У бібліотеці конгресу США у 2024 р. опубліковано доповідь, присвячену EGS системам [15]. Наведемо основні тези з доповіді. EGS адаптують і використовують технології та процеси, що спочатку розроблені для нафтогазової галузі, для доступу до більш великих і глибоко залягаючих геотермальних джерел енергії. Вже у 2023 році федеральні та галузеві науково-дослідні та дослідно-конструкторські проекти продемонстрували ключові елементи, необхідні для рентабельної комерційної генерації електроенергії з використанням EGS. Основні проблеми пов'язані з технічними та супутніми витратами, що обумовлені адаптацією технологій буріння, стимуляцією та експлуатацією установок в умовах геотермального видобутку. Ці проблеми включають: виявлення та підтвердження наявності достатніх підземних геотермальних ресурсів; буріння свердловин до та через глибокі тверді породи; експлуатацію у високотемпературних, хімічно активних геохімічних умовах; підтримку ефективного та сталого вироблення електроенергії протягом десятиліть. Згідно з прогнозами Міністерства енергетики США, розвиток EGS може забезпечити 90 ГВт потужностей з виробництва геотермальної електроенергії до 2050 року, що потенційно забезпечить до 12% попиту на електроенергію в США. Геотермальна енергія завжди доступна, не вимагає витрат на паливо, а також має низький рівень викидів, який можна порівняти з відновлюваними джерелами енергії, такими як сонячна та вітрова. За життєвий цикл геотермальні станції, у тому числі EGS, мають нижчі викиди на кВт·год, ніж сонячна фотоелектрична енергія. Розробники в галузі геотермальної енергії можуть використовувати численні ресурси нафтогазової галузі, включаючи бурові установки та інше обладнання, свердловини, що не використовуються або недовикористовуються, технології буріння та управління розробкою родовищ, бази знань про ресурси та експлуатацію, а також навички та досвід робочої сили. Але дуже важлива державна підтримка: конгрес може підтримати розширення EGS та виділити кошти на конкретні демонстраційні проекти EGS — особливо дорогий елемент розвитку EGS, або розглянути способи застосування існуючих федеральних стимулів, наприклад, податкових пільг, що знижують ризики та витрати на освоєння ресурсів EGS, до геологорозвідки чи освоєння ресурсів EGS [15]. Незважаючи на технічні і фінансові труднощі, розробка та вдосконалення EGS геотермальних систем є світовим трендом. Тому Україні необхідно приєднатися до цього напрямку.

Висновки:

1. Аналіз нових екологічних і кліматичних тенденцій, які спричинено зростанням вмісту парникових газів і глобальним потеплінням, вказує нам на необхідність швидкого розвитку відновлюваної енергетики, зокрема, геотермальної енергетики.

2. Потрібні науково-технічні зусилля щодо створення і вдосконалення геотермальних технологій EGS, які дозволять використовувати тепло гірських порід на великих глибинах (до 5 км і глибше). При цьому можливі, як мінімум, два варіанти EGS: які використовують гідророзрив пластів на глибині, і які не використовують гідророзрив, а використовують горизонтальні трубопроводи на глибині зі створенням замкненого циклу руху теплоносія у трубопроводах.
3. Для досягнення максимальної ефективності EGS необхідно проводити роботи зі створення геотермальних станцій у Закарпатському прогині, а також вздовж узбережжя Чорного та Азовського морів.

ПОСИЛАННЯ

1. Möller T., Högner A. E., Schleussner C. F. *et al.* Achieving net zero greenhouse gas emissions critical to limit climate tipping risks. *Nat Commun* 15, 6192 (2024). DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-49863-0>.
2. Carly Cassella. Earth's Climate Faces Risk of No Return If Warming Exceeds 1.5 °C (14.08.2024). URL: <https://www.sciencelert.com/earths-climate-faces-risk-of-no-return-if-warming-exceeds-1-5-c> (дата звернення: 02.03.2026).
3. Відновлювані джерела енергії / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: ІВЕ НАНУ. 2020. 392 с.
4. Морозов Ю. П. Видобування геотермальної енергії: монографія. Київ: ІВЕ. 2022. 245 с.
5. 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. DOI: <http://dx.doi.org/10.36296/atlas-2024>.
6. Шурчкова Ю. А. Стартовые условия для развития геотермальной энергетики в Украине. *The problems of general energy*, 2019, 2(57): 35–40. DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2019.02.035>.
7. International Energy Agency (IEA). *Renewables 2022: Analysis and Forecast to 2027*. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ada7af90-e280-46c4-a577-df2e4fb44254/Renewables2022.pdf> (дата звернення: 02.03.2026).
8. Морозов Ю. П., Дубовський С. В. Технологічні схеми ГеоТЕС на геотермальних родовищах з аномально високим пластовим тиском. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 2. С. 81-92. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2\(65\).81-92](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.2(65).81-92).
9. Морозов Ю. П. Підвищення дебіту геотермальних свердловин «ГЕОГІДРОЛІФТ». *Відновлювана енергетика*. 2022. № 3. С. 88-92. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3\(70\).88-92](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.3(70).88-92).
10. Барило А. А. Способи поводження з відпрацьованим теплоносієм у геотермальних енергетичних установках. *Відновлювана енергетика*. 2024. № 1. С. 101-108. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\)101-108](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76)101-108).
11. C. R. Chamorro, M. E. Mondejar. *Geothermal Power: Technologies and Current Status*. *Encyclopedia of Sustainable Technologies (Second Edition)*. 2024. Vol. 3. Pp. 65-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90386-8.00019-X>.
12. Enabling Local Energy Autonomy... Everywhere (Official website). URL: <https://eavor.com> (дата звернення: 02.03.2026).
13. The World's first truly scalable form of Green Baseload Power demonstrated by Eavor Technologies Inc. / Eavor Technologies Inc. (2020). URL: <https://web.archive.org/web/20200701065534/https://eavor.com/press-release/worlds-first-truly-scalable-form-green-baseload-power-demonstrated-eavor-technologies> (дата звернення: 02.03.2026).
14. Sonal Patel. Eavor's First-of-Its-Kind Closed-Loop Geothermal Project Produces Grid Power in Germany (January 8, 2026). URL: <https://www.powermag.com/eavors-first-of-its-kind-closed-loop-geothermal-project-produces-grid-power-in-germany/> (дата звернення: 02.03.2026).
15. Morgan Smith. Enhanced Geothermal Systems (EGS): Frequently Asked Questions (06.07.2024). URL: <https://www.congress.gov/crs-product/R48090#:~:text=in%20western%20states.,2,electricity%20generation%20in%20the%20plant> (дата звернення: 02.03.2026).

АНАЛІЗ ІСНУЮЧОЇ СИСТЕМИ ОТРИМАННЯ ТЕПЛОТИ ТА ХОЛОДУ ФАРМАЦЕВТИЧНОГО ПІДПРИЄМСТВА: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

І. В. Перепелиця¹, О. В. Зур'ян²

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

Пропонована концепція передбачає інтеграцію теплових насосів для утилізації скидного тепла холодильних машин, максимальному використанні технології Free Cooling та інтелектуальне SCADA-управління режимами на основі динамічних тарифів, що в комплексі формує методологічну базу для побудови високоефективних гібридних енергетичних комплексів із мінімальними питомими енерговитратами.

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

ORCID: 10009-0000-9724-8368; 20000-0002-2391-1611

ANALYSIS OF THE EXISTING HEAT AND COLD SUPPLY SYSTEM OF A PHARMACEUTICAL ENTERPRISE: ADVANTAGES AND DISADVANTAGES

I. V. Perepelytsia¹, O. V. Zurian²

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

The proposed concept involves the integration of heat pumps for the recovery of waste heat from refrigeration machines, the maximization of Free Cooling technology, and intelligent SCADA-based management of operating modes based on dynamic tariffs. Collectively, these elements form a methodological framework for constructing high-efficiency hybrid energy complexes with minimal specific energy consumption.

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

ORCID: ¹0009-0000-9724-8368; ²0000-0002-2391-1611

Сучасний етап розвитку світової промисловості характеризується глобальним переходом до моделі сталого розвитку та декарбонізації виробничих процесів. Для фармацевтичного сектору України, який є надзвичайно енергоємним через необхідність суворого дотримання стандартів GMP та GDP, питання енергонезалежності та зниження частки викопного палива стає критичним не лише з економічної, а й з безпекової точки зору. Традиційні системи енергозабезпечення підприємств галузі, що базуються на спалюванні природного газу для генерації тепла та споживанні значних обсягів мережевої електроенергії для охолодження, потребують докорінної трансформації шляхом інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ).

Проте на практиці виникає «проблема вибору», коли при проектуванні холодильних систем великої потужності (понад 1 МВт) перевага віддається класичним рішенням без урахування можливостей ВДЕ. Системи опалення зазвичай, побудовані на основі газових котлів, парових котлів або електричних обігрівачів. Головні їх недоліки це вуглецеві викиди в атмосферу та високі витрати на паливо. Використання теплових насосів «вода-вода» дозволяє не лише замінити споживання газу для ГВП та опалення, а й інтегрувати систему в загальний енергетичний кластер підприємства. Це створює умови для повної відмови від викопного палива в перехідні та літні періоди, коли надлишкове технологічне тепло може бути ефективно рекупероване.

Особливої уваги заслуговує синергія технологій Free Cooling та теплових насосів. У холодний період року технологія вільного охолодження використовує природний потенціал зовнішнього повітря (відновлюваний ресурс), мінімізуючи роботу компресорів. Водночас тепловий насос дозволяє підняти потенціал скидної теплоти холодильного контуру до рівня, придатного для опалення приміщень. Такий підхід перетворює холодильну установку з чистого споживача на активний елемент теплозабезпечення, що є основою енергоефективної архітектури сучасного підприємства.

Дана робота спрямована на теоретичне та практичне обґрунтування заміщення викопного палива шляхом створення гібридної системи холодо- і теплозабезпечення. Основна увага приділена аналізу енергетичних потоків та виявленню можливостей інтеграції ВДЕ у технологічний цикл.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до енергобалансу підприємства, де холодильна мережа розглядається не як споживач ресурсів, а як стабільне джерело низькопотенційного тепла для теплонасосних установок, що працюють в умовах динамічної зміни вартості енергоносіїв.

Було виконано техніко-економічне обґрунтування інтеграції теплового насосу між системою холодозабезпечення та теплопостачання. Прогнозований простий термін окупності при цьому складає 1,2 роки.

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 дозволяє 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 та архівування інформації та керування SCADA всією розглянутою системою холодозабезпечення відбувається за допомогою програмного продукту від компанії Siemens - Desigo CC.

Ключовим чинником рентабельності системи є інтелектуальне керування споживанням відповідно до погодинних тарифів на електроенергію (згідно з Постановами НКРЕКП №307 та №308 «Про затвердження Правил ринку»).

Для фармацевтичного підприємства, що працює на ринку «на добу наперед» (РДН), вартість електроенергії суттєво різниться протягом доби:

Нічний період (23:00 – 07:00): Мінімальні тарифи. У цей час система програмується на максимальну генерацію тепла за допомогою ТН з акумуляцією у буферних ємностях.

Пікові години (ранок 08:00 – 11:00, вечір 17:00 – 22:00): Максимальна вартість. SCADA-система переводить об'єкт на споживання накопиченої енергії або активує режим Free Cooling, мінімізуючи споживання електроенергії компресорами.

Денний період: Балансування між використанням ТН та газової генерації залежно від поточної ціни газу та COP (коефіцієнту перетворення) теплового насоса.

За результатами проведених розрахунків рентабельність роботи теплового насосу збільшується на 16%.

Висновок:

У ході проведеного дослідження визначено, що інтеграція теплового насоса типу «вода-вода» у холодильну мережу дозволяє використовувати стабільне джерело низькопотенційного тепла (гліколевий контур з температурою +12°C). Це створює умови для заміщення традиційного палива при підготовці гарячої води та опаленні, особливо у перехідні періоди року.

Доведено, що комбіноване застосування технології Free Cooling та теплових насосів дозволяє максимально використовувати відновлювані джерела енергії (зовнішнє повітря та вторинну теплоту).

Встановлено, що рентабельність системи прямо залежить від інтелектуального управління режимами роботи відповідно до погодинних тарифів на електроенергію (РДН).

ПОСИЛАННЯ

1. Про затвердження Правил ринку: Постанова Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг від 14.03.2018 № 307. URL:
2. <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/v0307874-18#Text> (дата звернення: 04.11.2021).
3. 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).
4. 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). – 2023. – С. 94-102. <https://doi.org/10.32782/1995-0519.2023.5.11>
5. Кузнецов 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/Kuznetsov_monografy_PRINT.pdf
6. Перепелиця І. В., Зур'ян О. В. Прикладна методологія комплексного застосування технологій free cooling і тепловий насос. Відновлювана енергетика. 2024 (1(76)). 109-117. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1\(76\).109-117](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.1(76).109-117)

ВПЛИВ КЛІМАТИЧНИХ УМОВ МІСЦЕВОСТІ МІСТА КИЄВА НА ТЕПЛОВИЙ ПОТЕНЦІАЛ ГРУНТОВО-ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛОБМІННИКА

О. М. Недбайло^{1,2}, О. Ю. Черноусенко², К. Д. Сліжевський², О. В. Власенко²

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. Берестейський, 37, Київ, 03056, Україна, e-mail: kirillslizevskij@gmail.com

Дане дослідження має на меті проаналізувати тепловий потенціал системи із горизонтальним трубопроводом повітряно-ґрунтового теплообмінника у субконтинентальних кліматичних умовах міста Києва з урахуванням сучасних тенденцій глобального потепління

Ключові слова: сезонна інсоляція, геотермальна вентиляція, температура сонячного повітря, температура ґрунту.

THE INFLUENCE OF CLIMATIC CONDITIONS OF THE KYIV CITY AREA ON THE THERMAL POTENTIAL OF THE EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER

O. Nedbailo^{1,2}, O. Chernousenko², K. Slizhevskiy², O. Vlasenko²

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. Beresteyskiy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine.

This study aims to analyze the thermal potential of a system with a horizontal Earth-to-Air Heat Exchanger pipeline in the subcontinental climatic conditions of the city of Kyiv, taking into account current global warming trends.

Key words: seasonal insolation, geothermal ventilation, solar-air temperature, soil temperature.

ORCID: ¹0000-0003-1416-9651, ²0000-0002-8975-0873

Однією з найбільш перспективних технологій, що дозволяє суттєво підвищити енергоефективність будівель, є використання низькопотенційної геотермальної енергії поверхневих шарів Землі. Технологія повітряно-ґрунтових теплообмінників (Earth-to-Air Heat Exchangers — ЕАНЕ) базується на використанні природної теплової інерції ґрунту. Дана робота є продовженням аналізу експлуатаційних параметрів системи геотермальної вентиляції із врахуванням динаміки сезонних факторів, що суттєво залежать від інтенсивності теплообміну в повітряно-ґрунтовому теплообміннику та теплового впливу інсоляції на поверхню ґрунтового масиву. Надалі будуть наведені результати математичного моделювання теплотехнічних параметрів цілорічної експлуатації системи геотермальної вентиляції та її енергетичної ефективності на основі аналізу вихідних даних з експериментальних досліджень з робіт [1, 2] та врахуванням актуальних змін кліматичних умов м. Києва. Описання способу отримання експериментальних даних, конструкції експериментального натурного стенду із П-подібним повітряно-ґрунтовим теплообмінником внутрішнім діаметром $D = 0,110$ м і довжиною $L = 43$ м, що розташований на глибині $z = 2,5$ м (глибше за визначену глибину промерзання, що для м. Києва становить $0,8-1,2$ м [3]) та забезпечує належну експлуатацію в діапазоні позитивних температур в щільному підзолистому ґрунті, а також використаного контрольно-вимірювального обладнання, міститься в авторських статтях [1, 2]. Об'ємна витрата повітря в трубопроводі мала цілорічно постійне значення $0,037$ м³/с (швидкість $\approx 3,8$ м/с). Актуальні осереднені значення, із спостережень помісячно, кліматичних параметрів даної місцевості, отримані від Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського, Україна, Київ. Клімат Києва класифікується як вологий континентальний (Dfb за класифікацією Кеппена), що характеризується значною сезонною амплітудою температур. Тепловий вплив прямої та розсіяної сонячної радіації призводить до того, що

середньорічна температура поверхні ґрунту є вищою за температуру повітря. Це явище описується концепцією сонячно-повітряної температури $T_{sol-air}$. Київ (географічні координати $50^{\circ}27'$ пн. ш.) характеризується помірним рівнем інсоляції. За даними Центральної геофізичної обсерваторії імені Бориса Срезневського річна сумарна сонячна радіація на горизонтальну поверхню (GHI) становить близько 1220 кВт·год/м^2 . Літній пік - у червні-липні, коли середньомісячна сума надходження сонячної теплоти досягає максимуму, суттєво прогріваючи верхні шари ґрунту. Зимовий мінімум - у грудні-січні, через низьку висоту сонця та значну хмарність (всього 6,5 год сонячного світла на день у грудні проти 15,5 год у серпні), радіаційний притік є мінімальним.

$$T_{sol-air} = T_{amb} + \frac{\alpha \cdot I}{h_{ext}} - \frac{\Delta R}{h_{ext}}, \quad (1)$$

де α - коефіцієнт поглинання сонячної радіації поверхнею (для трав'яного покриву/чорнозему приймається 0,7);

I - інтенсивність сонячної радіації, Вт/м^2 ;

h_{ext} - коефіцієнт тепловіддачі на поверхні (залежить від швидкості вітру, приймається $23 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$);

ΔR - довгохвильове випромінювання в небо (приймається еквівалентним зниженню температури на 3-4 К).

Інтеграція цих факторів показує, що середньорічна температура поверхні ґрунту в Києві на $1,5\text{-}2,0^{\circ}\text{C}$ вища за середньорічну температуру повітря. Таким чином, для подальших розрахунків приймається базова середньорічна температура ґрунту $T_{mean} = 11,0^{\circ}\text{C}$.

Розрахунки за відповідними рівняннями цілорічного розподілу температури ґрунту та балансових виразів для визначення енергетичних показників експлуатації системи геотермальної вентиляції [1, 2] із сезонним впливом сонячного випромінювання на земну поверхню проводились у програмному середовищі із використанням ядра символічних обчислень MAPLE. Теплова інерційність характеризується властивістю ґрунтового масиву чинити опір зміні температури, що зумовлена його питомою теплоємністю. При цьому стан цієї термодинамічної системи у момент часу t є функцією інтегралу теплових потоків за попередній період. При цьому має місце сезонна асиметрія залежності температури ґрунту T_{soil} від сонячно-повітряної температури $T_{sol-air}$ (рис. 1).

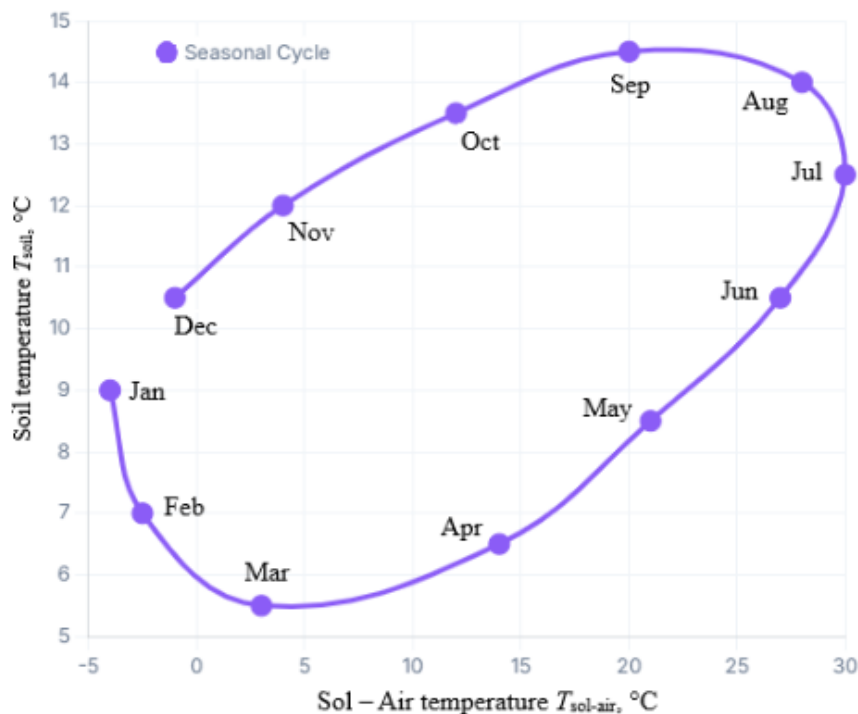


Рис. 1. Ефект температурного гістерезису залежності температури ґрунту T_{soil} від сонячно-повітряної температури $T_{sol-air}$ в кліматичних та геологічних умовах місцевості м. Києва

Петля гістерезису відображає фазове відставання реакції системи від збурювального фактору. Це підтверджує можливість ґрунту як сезонного теплового акумулятора (Seasonal Thermal Energy Storage - STES). Весняний період (нижня гілка петлі): повітря вже тепле, але ґрунт ще залишається прохолодним. Осінній період (верхня гілка петлі): повітря вже прохолодне, але ґрунт віддає накопичену теплоту. Чим ширша петля, тим більша інерційність системи, що характеризує ємність ґрунтового теплового акумулятора.

ПОСИЛАННЯ

1. Boris Basok, Anatoliy Pavlenko, Ihor Bozhko, Maryna Novitska, Aleksandr Nedbailo, Hanna Koshlak, Myroslav Tkachenko (2022). Analysis of the Energy Efficiency of the Earth-To-Air Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 24. 202–213. <https://doi.org/10.54740/ros.2022.015>
2. Boris Basok, Oleksandr Nedbailo, Ihor Bozhko, Maryna Novitska, Myroslav Tkachenko. (2021). Numerical modeling and experimental studies of the operational parameters of the earth-to-air heat exchanger of the geothermal ventilation system. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 23, 2021. 42 – 64. <https://doi.org/10.54740/ros.2021.003>
3. Martazinova, V. & Shpyg, Vitalii & Kyhtenko, Yaroslav. (2023). Analysis of solar radiation changes in large cities of Ukraine in the summer period. International Conference of Young Scientists on Meteorology, Hydrology and Environmental Monitoring (ICYS-MHEM). 21-21. <https://doi.org/10.15407/icys-mhem.2023.021>

ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ДВОСТАДІЙНОГО ВИДОБУВАННЯ ГЕОТЕРМАЛЬНИХ РЕСУРСІВ У ГІДРОГЕОЛОГІЧНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ

Ю. П. Морозов¹, О. В. Бачеріков², І. В. Лобанова³,

^{1,2,3} Інститут відновлюваної енергетики НАН України

03143, м. Київ, вул. вул. Метрологічна, 50,

тел./факс 206-28-09, e-mail: geotherm@ukr.net

¹ д-р техн. наук. <https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

² канд. техн. наук. <https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

³ <http://orcid.org/0009-0007-0625-8052>

Проведено аналіз енерговитрат на повернення відпрацьованого теплоносія в надра при видобутку тепла за допомогою геотермальної циркуляційної системи (ГЦС). Для оцінки енерговитрат використано фактичні дані повернення супутніх пластових вод у нафтовидобувній промисловості. Показано, що розділення видобутку теплоносія на дві стадії з початковим етапом закачування відпрацьованого теплоносія у вище розташований поглинаючий горизонт значно скорочує енерговитрати під час експлуатації ГЦС.

Ключові слова: геотермальна циркуляційна система, видобувні й нагнітальні свердловини, відпрацьований теплоносій, енерговитрати, двостадійне видобування, поглинальний горизонт, дебіт теплоносія, теплова продуктивність, температурний режим, геотермальне родовище.

APPLICATION OF TWO-STAGE GEOTHERMAL RESOURCES EXTRACTION TECHNOLOGY IN HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF UKRAINE

Morozov Yu.1, Bacherikiv O.2, Lobanova I. 3

^{1,2,3} 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

¹ Doc. of Tech. Sciences. <https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

² Cand. of Tech. Sciences. <https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

³ <http://orcid.org/0009-0007-0625-8052>

¹ Doc. of Tech. Sciences. <https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

² Cand. of Tech. Sciences. <https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

¹ Institute of Renewable Energy NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine

An analysis of energy consumption was carried out for the return of processed heat transfer to the heat exchanger using an additional geothermal circulation system (GCS). To estimate energy consumption, factual data on the rotation of adjacent formation waters in the oil industry are used. It has been shown that dividing the heat transfer fluid into two stages with the initial stage of pumping the recovered heat transfer into the sedimentary clay horizon significantly reduces energy consumption during the operation of the GCS.

Key words: geothermal circulation system, production and injection wells, waste coolant, energy consumption, two-stage production, absorption horizon, coolant flow rate, thermal productivity, temperature regime, geothermal field.

Вступ. Геотермальні циркуляційні системи (ГЦС) є основним напрямом добування теплоти Землі. Як показав досвід роботи кримських ГЦС, однією з головних проблем під час їх експлуатації є зворотне закачування відпрацьованих, тобто охолоджених, термальних вод. При цьому важливим є не тільки можливість забезпечити закачування води, але і величина тиску, необхідного для здійснення закачування, яка разом з дебітом повністю визначає енергетичні витрати на роботу ГЦС. Досвід роботи ГЦС показав, що величина тиску нагнітальної свердловини зростає протягом експлуатації ГЦС, додатково збільшуючи енергетичні витрати [1].

Технологія повернення відпрацьованих термальних вод в надра є важливою складовою геотермальних проектів і від величини енерговитрат на цей процес залежить рентабельність отримання гідротермального тепла.

Для вибору оптимального рішення питання повернення відпрацьованих термальних вод (ВТВ) доцільно використовувати численні дослідження й практичний досвід заховання супутніх пластових вод (СПВ) при розробці нафтогазових родовищ [2, 3].

Зокрема, досвід розробки нафтогазових родовищ показує, що для охорони довкілля найбезпечнішим і економічно найдоцільнішим є спосіб повернення СПВ у підземні горизонти.

На початковій стадії розробки родовищ весь об'єм СПВ повертають у вище розташовані високопроникні водоносні горизонти. Якщо в процесі розробки родовища відбулось суттєве падіння пластового тиску переходять до другої стадії, на якій разом з поверненням СПВ у поглинаючий водоносний горизонт частину об'єму СПВ закачують через нагнітальні свердловини назад у продуктивний горизонт з метою підтримки пластового тиску (ППТ). У гідрогеологічних умовах України видобуток геотермальних ресурсів з використанням циркуляційної системи в більшості випадків також може бути реалізований тільки з підтримкою пластового тиску.

Як СПВ, так і термальні води залягають у глибоких проникних горизонтах, мають подібний хімічний склад і перебувають в аналогічних термобаричних умовах. Тому технологія повернення СПВ у надра може бути прийнята за основу і для повернення ВТВ у геотермальній циркуляційній системі.

У технології повернення як СПВ, так і ВТВ першочергове значення має вибір вище розташованого приймального пласта.

У центральній частині України в межах Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ) відомі такі водоносні комплекси: кайнозойський, крейдовий, юрський, тріасовий, кам'яновугільний [2, 3]. З них найбільше відповідає гідрогеологічним і гідродинамічним вимогам збереження довкілля при поверненні СПВ у надра водоносний комплекс тріасу.

Тріасовий водоносний комплекс не має тектонічних порушень і літологічно представлений різнозернистими пісковиками. Пластові води мають хлоридно-натрієвий та хлоридно-кальцієво-натрієвий склад з мінералізацією від 55 до 140 г/дм³ і не використовуються в народному господарстві.

Водоносний горизонт тріасу відповідає головній вимозі до поглинальних пластів: він надійно ізолюваний у покривлі й підшві 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 за товщиною, характеризується високими ємнісними й фільтраційними властивостями. Товщина в межах ДДЗ становить до 350 м, пористість досягає 30 %, а середня проникність змінюється від 300–600 до 1479–3141 мД. Це забезпечує високу поглинальну здатність водоносного горизонту й можливість прийому намічених об'ємів СПВ [2].

Важливим питанням є сумісність СПВ з водою тріасового горизонту. Основне ускладнення при змішування СПВ з пластовою водою може викликати утворення і випадання в осад гіпсу, карбонатів кальцію та магнію. Ці реакції відбуваються тільки в лужному середовищі. Досвід повернення СПВ у нафтогазовій галузі показує, що підтримка кислого середовища під час підготовки СПВ для повернення в надра запобігає кольматації привибійної зони поглинального пласта і забезпечує тривалий термін роботи нагнітальних свердловин без помітного зниження їх приймальності [3].

Таким чином, на основі досліджень та багатолітнього промислового досвіду тріасовий водоносний горизонт районований як поглинальний для повернення СПВ у надра в межах ДДЗ. А проведений вище аналіз дозволяє рекомендувати водоносні горизонти тріасу для зворотного закачування ВТВ ГЦС.

Зворотне повернення частини СПВ у продуктивний горизонт для підтримки пластового тиску на другій стадії розробки родовища не вимагає складних рішень, але витрати на цей процес значно вищі, ніж на повернення в поглинальний водоносний горизонт тріасу. Цей фактор є визначальним при переході на другу стадію роботи ГЦС.

Оцінку енергетичних витрат на реалізацію цих процесів зроблено на основі фактичних даних повернення СПВ у надра на Малодівицькому нафтовому родовищі в 2017–2018 роках. У роботі [2] наведено дані повернення СПВ на другій стадії розробки родовища в поглинальний водоносний горизонт тріасу (T_n) 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 N9 і N14 становив $35\,770\text{ м}^3$, а у водоносний горизонт тріасу через нагнітальні свердловини N25, 36, 41 за аналогічний період досягнув $222 - 285\text{ м}^3$.

Результати аналізу параметрів нагнітання СПВ в надра на Малодівицькому нафтовому родовищі наведено в таблиці. При цьому, виходячи з наявних даних [2], коефіцієнт приймальності свердловин визначали за формулою:

$$K_n = Q_n / P_r.$$

Показники енергетичних витрат на повернення СПВ у надра на прикладі Малодівицького нафтового родовища показують, що коефіцієнт приймальності водоносного горизонту тріасу приблизно в 2–10 разів вищий, ніж при нагнітанні в продуктивні горизонти для ППТ. Таке співвідношення можна враховувати і для гідротермальних родовищ ДДЗ з аналогічними геологічними умовами. Перехід до другої стадії видобутку теплоносія визначається вартістю повернення його в продуктивний горизонт. Початок і обсяги закачування відпрацьованого теплоносія в продуктивний горизонт визначаються співвідношенням вартості закачування відпрацьованого теплоносія в надра і вартості отриманого від цього додаткового тепла. Цю залежність можна виразити формулою:

$$C_{\text{ВТВ}} \cdot V_{\text{ВТВ}} < C_{\text{Т}} \cdot DV_{\text{ТВ}} \cdot C_{\text{ТВ}} \cdot (T_{\text{П}} - T_{\text{К}}),$$

де

$C_{\text{ВТВ}}$ – вартість повернення 1 м^3 ВТВ у продуктивний горизонт;

$V_{\text{ВТВ}}$ – об'єм повернення ВТВ у продуктивний горизонт;

$C_{\text{Т}}$ – вартість одиниці тепла;

$DV_{\text{ТВ}}$ – об'єм додатково видобутих термальних вод;

$C_{\text{ТВ}}$ – теплоємність термальної води;

$T_{\text{П}}$ і $T_{\text{К}}$ – початкова і кінцева температура термальної води.

Отримані результати рекомендовано використовувати при виборі горизонтів і співвідношення об'ємів повернення ВТВ при двостадійному видобуванні геотермальних ресурсів на основі циркуляційної системи.

ПОСИЛАННЯ

1. Видобування геотермальної енергії: монографія / Ю. П. Морозов. Київ: ІВЕ. 2022. 245 с.
2. Звіт з оцінки впливу на довкілля планової діяльності з видобування корисних копалин НГВУ «Чернігівна-фтогаз» ПАТ «Укрнафта» на Малодівицькому родовищі. Київ. 2018 р. 171 с.
3. Звіт з оцінки впливу на довкілля планової діяльності з видобування вуглеводнів (нафта, газ природний, газ, розчинений у нафті, конденсат, супутні компоненти – корисні копалини загальнодержавного значення) Кузьмичівсько-Недільного родовища, розташованого на території Харківської області, Богодухівський район, АТ «Укргазвидобування» Код ЄДРПОУ 30019775. Київ. 2021 р. 121 с.

REFERENCES

1. Vydobuvannya heothermal'noyi enerhiyi: monohrafiya / Yu. P. Morozov. Kyiv: IVE. 2022. 245 s.
2. Zvit z otsinky vplyvu na dovkillya planovoyi diyal'nosti z vydobuvannya korysnykh kopalyn NHVU «Chernihiv- naftohaz» PAT «Ukrnafta» na Malodivys'komu rodo- vyshchi. Kyiv. 2018 r. 171 s.
3. Zvit z otsinky vplyvu na dovkillya planovoyi diyal'nosti z vydobuvannya vuhlevodniv (nafta, haz pryrodnyy, haz, rozchynenyy u nafti, kondensat, suputni komponenty – korysni kopalyny zahal'noderzhavnoho znachennya) Kuz'mychivs'ko-Nedil'noho rodovysycha, roztashova- noho na terytoriyi Kharkivs'koyi oblasti, Bohodukhiv- s'kyi rayon, AT «Ukrhazvydobuvannya» Kod YEDRPOU 30019775. Kyiv. 2021 r. 121 s.

ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИЙ ДВОСТУПЕНЕВИЙ ТЕПЛОВИЙ НАСОС «ПОВІТРЯ-ВОДА» НА R744 (CO₂) ДЛЯ ОПАЛЕННЯ БУДІВЛІ

Е. П. Пастушенко

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна
тел. 0675200375, e-mail: pastushenko@vde.com.ua*

Розглянуто варіант високотемпературного повітряного теплового насосу з робочим тілом CO₂ – R513a для опалення та приготування гарячої води в будівлі з радіаторною системою опалення.

Ключові слова: енергоефективність, теплові насоси з джерелом тепла у вигляді повітря, високотемпературні теплові насоси, двоконтурні теплові насоси, комп'ютерне моделювання.

ORCID: 0009-0006-3148-9277

Вступ. Загальні засади застосування високотемпературного теплового насосу «повітря-вода» з робочим тілом CO₂ та R513a.

Теплові насоси (ТН) широко визнані як ключова технологія чистої енергії в енергетичному переході до вуглецевої енергетики. ТН, які працюють від електроенергії з низьким рівнем викидів, є центральною технологією глобального переходу до безпечного та стійкого опалення. ТН, особливо т.зв. «зелені» ТН — це установки і технології отримання теплоти з низьким вмістом вуглецю, які мають потенціал для значного скорочення парникових викидів при теплозабезпеченні промисловості і, особливо, будівель. Вони, як правило, використовують електроенергію для трансформації низькопотенційної теплоти навколишнього повітря, води або ґрунту чи скидної техногенної теплоти для опалення будівлі та її гарячого водопостачання (ГВП). Цей процес є ефективним, оскільки теплові насоси постачають від трьох до п'яти одиниць теплоти на кожну одиницю електроенергії, необхідної для їх роботи. Окрім високої енергоефективності, теплові насоси також використовують переважно відновлювану теплоту, тому 70–80% теплової енергії, яку виробляє середній ТН, є теж відновлюваною. Якщо електроенергія, що використовується для приводу електричного компресора, виробляється з джерел з низьким вмістом вуглецю, то майже вся корисна теплота отримується в ТН також з низьким або навіть нульовим вмістом вуглецю. Тому ТН вважаються ключовим, економічно ефективним рішенням для боротьби з викидами вуглецю.

Останніми роками спостерігається доволі активне заміщення озоноруйнівних речовин, зокрема, на підставі НФС, природними холодоагентами. Зважаючи на те, що кінцевою речовиною - холодоагентом є CO₂, буде цілком логічним одразу здійснити перехід до теплових насосів на CO₂. Такі теплові насоси мають певні особливості.

Буде розглянуто тепловий насос, яким облаштовано будівлю Інституту Технічної Теплофізики. Його зроблено в багаторівневому виконанні. Верхній теплообмінник – випарник знаходиться на наддаховій надбудівлі. Компресорний блок знаходиться безпосередньо на даху. Теплообмінники – на верхньому поверсі будівлі (III поверх). Буферна ємність, під'єднана до існуючої системи опалення – на першому поверсі будівлі.

В процесі впровадження було розроблено схему, де перший (низькотемпературний) контур працює на CO₂, а другий контур (високотемпературний) – на R513a.

Застосування теплового насосу

Мета даної роботи - розробка та апробація методики розрахунку параметрів двоступеневого двоконтурного теплового насосу типу «повітря – вода» з використанням холодоагентів R744 (CO₂) та R513a для системи опалення адміністративної будівлі.

Конкретною задачею дослідження є визначення параметрів роботи двоконтурного теплового насосу тепловою потужністю 120 кВт при температурі зовнішнього повітря до –25 °С для системи опалення адміністративної будівлі ІТТФ НАН України.

Для досягнення поставленої мети були сформульовані такі основні завдання:

- розробити розрахункову модель двоконтурного теплового насосу з використанням програмного середовища Flownex SE;
- визначити основні термодинамічні параметри циклів холодоагентів R744 та R513a у характерних точках системи;

- дослідити вплив температури зовнішнього повітря у діапазоні від -25 до $+10$ °C на основні експлуатаційні характеристики ТН;
- визначити залежності керуючих параметрів системи (обертів компресорів, ступеня відкриття регулюючих вентилів) від температури зовнішнього повітря;
- оцінити зміну теплової потужності, масових витрат холодоагентів та коефіцієнта енергоефективності теплонасосної системи

Методичні підходи. Для дослідження параметрів роботи двоступеневої теплонасосної системи використано метод комп'ютерного моделювання термогидравлічних процесів у програмному середовищі Flownex SE. Це програмне середовище дозволяє моделювати складні енергетичні системи, що включають компресори, теплообмінники, трубопроводи та регулюючу арматуру, з урахуванням взаємодії теплових і гідравлічних процесів. Розрахункова модель теплонасосної системи була побудована відповідно до розробленої принципової схеми. У моделі враховано основні елементи обох контурів ТН, включаючи компресори, випарники, конденсатори, міжконтурний теплообмінник та регулюючу арматуру

Двоконтурний ТН функціонує за принциповою схемою, яка включає випарник «повітря- CO_2 », компресори (на CO_2 – перший контур та на R513a – другий контур), конденсатор/випарник « CO_2 -R513a», пароохолоджувач « CO_2 -вода», переохолоджувач «R513a -вода», та інші допоміжні елементи.

Результати моделювання роботи теплонасосної системи. Розрахунок базується на термодинамічному аналізі парокompресійного циклу двоконтурного теплового насоса. Основна мета моделювання - визначити параметри робочого процесу (температури T , тиску P , ентальпії h , ентропії s в ключових точках циклу), розрахувати необхідну масову витрату холодоагентів m , споживану потужність компресорів W для досягнення заданої теплової потужності користувача Q .

Результати розрахунків. Деталізація робочої схеми дозволяє не лише зрозуміти послідовність процесів у кожному контурі ТН, але й візуально зв'язати фізичні компоненти системи з їхніми термодинамічними станами, що є важливим для аналізу та оптимізації роботи двоконтурного теплового насоса. Всі компоненти були розділені на керуючі компоненти і компоненти залежні від керуючих.

Висновки.

У роботі проведено дослідження параметрів двоступеневої двоконтурної теплонасосної системи типу «повітря – вода», призначеної для системи опалення адміністративної будівлі, із використанням холодоагентів R744 (CO_2) у першому контурі та R513a у другому контурі. На основі виконаного дослідження можна зробити такі висновки.

1. Розроблено розрахункову модель двоконтурної теплонасосної системи у програмному середовищі Flownex SE, яка дозволяє досліджувати термогидравлічні процеси у системі та визначати основні параметри її роботи при різних температурних умовах зовнішнього повітря.
2. Виконано чисельне моделювання роботи теплонасосної системи тепловою потужністю близько 120 кВт у діапазоні температур зовнішнього повітря від -25 °C до $+10$ °C. Отримані результати показали, що застосування каскадної схеми теплонасосу з використанням холодоагентів R744 та R513a дозволяє забезпечити стабільну роботу системи опалення будівлі у широкому діапазоні температурних умов.
3. Досліджено залежності основних експлуатаційних параметрів теплонасосної системи від температури зовнішнього повітря, зокрема теплової потужності, масових витрат холодоагентів, частоти обертання компресорів та коефіцієнта перетворення енергії COP.
4. Показано, що зі зниженням температури зовнішнього повітря спостерігається зменшення коефіцієнта енергоефективності теплонасосної системи, що пов'язано зі збільшенням роботи компресорів та зниженням температурного потенціалу джерела тепла. Разом з тим навіть при низьких температурах зовнішнього повітря теплонасосна система зберігає прийнятні показники ефективності.
5. Отримані результати моделювання підтверджують можливість застосування двоступеневих каскадних теплонасосних систем на базі холодоагентів R744 (CO_2) та R513a для тепlopостачання будівель з традиційними радіаторними системами опалення.
6. Розроблена модель теплонасосної системи може бути використана для подальшого дослідження режимів роботи теплонасосних установок та оптимізації їх параметрів при проектуванні систем тепlopостачання будівель.

Додаткове застосування. Отримані результати в частині опанування методики і програми розрахунку можна застосувати при моделюванні теплотехнічного устаткування для термомаскування нагрітих об'єктів, зокрема при ви-

конанні проекту №2025.06/0054 «Поглинання та запобігання поширенню електромагнітного випромінювання в інфрачервоному діапазоні та створення засобів теплового маскування» конкурсу Національного фонду досліджень України «Наука для зміцнення обороноздатності та національної безпеки України».

ПОСИЛАННЯ

1. Басок Б.І., Дубовський С.В., Пастушенко Е.П., Нікітін Є.Є., Базєєв Є.Т. Теплові насоси як тренд низьковуглецевого розвитку енергетики. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. Т. 75, № 2. С. 23–44. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2023.02>
2. Круковський Г.П., Басок Б.І., Скляренко Д.І. Комп'ютерне моделювання двоконтурного теплового насоса «повітря–вода» з використанням робочого тіла CO₂ при роботі в режимі нагрівання. Проблеми теплофізики та теплоенергетики: тези XIV Міжнар. онлайн-конф. (11–12 листопада 2025 р.). Київ: Симоненко О.І., 2025. С. 116–117. URL: https://ittf.kiev.ua/wp-content/uploads/2025/11/zbirka-tez-2025_nova-1.pdf
3. Басок Б.І., Дубовський С.В., Пастушенко Е.П., Мороз М.В., Веремійчук Г.М. Активна утилізація теплоти димових газів біопаливного котла. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2023. Т. 77, № 4. С. 67–80. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2023.06>
4. Дубовський С.В., Бабін М.Є. Сезонна ефективність теплових насосів з газомоторним приводом. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т. 41, № 5. С. 55.
5. Дубовський С.В., Басок Б.І., Бабін М.Є. Укрупнена оцінка теплової потужності та обсягів виробництва поновлювальної енергії тепловими насосами в Україні. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т. 41, № 5. С. 56.
6. Дубовской С.В., Басок Б.И., Твердохлеб А.С. Энергетическая эффективность комбинированного производства теплоты и холода. Доповіді Національної академії наук України. 2018. № 4. С. 47–53.
7. Про затвердження Методики обчислення частки енергії, виробленої тепловими насосами з відновлюваних джерел: наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України № 52 від 12.03.2018. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 03.04.2018 за № 395/31847.
8. Flownex Simulation Environment. Documentation. 2021. URL: <https://flownex.com/resources/> ; <https://flownex.com/industries/academic/> (дата звернення: 23.01.2026).
9. Mitsubishi Heavy Industries. Q-ton: CO₂ air-to-water heat pump. Technical specifications. 2018. URL: https://vamco.info/downloads/specifications_q-ton.pdf
10. Mitsubishi Heavy Industries. VRF systems: Air conditioning systems. 2018/19 product catalogue. 2018. URL: https://climatworld.com/downloads/%D0%9A%D0%B0%D1%82%D0%B0%D0%BB%D0%BE%D0%B3%D0%B8/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D0%B8%D1%86%D0%B8%D0%BE%D0%BD%D0%B5%D1%80%D1%8B/Mitsubishi%20Heavy/MHI_VRF%202018.pdf
11. Nekså P. CO₂ heat pump systems. International Journal of Refrigeration. 2002, 25(4), pp. 421–427. [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(01\)00033-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(01)00033-0)

GEOHERMAL HEAT PUMPS IN SPAIN: PECULIAR DETAILS OF USE AND MARKET

Hanna Liventseva

Geosciences Barcelona, CSIC

C/Lluís Solé i Sabarís s/n, 08028, Barcelona, Spain,

tel.: (050) 414 11 80, e-mail: hliventseva@geo3bcn.csic.es

The geothermal heat pump market has grown significantly in recent years in Europe (particularly in Spain) and worldwide.

Key words: *geothermal energy, geothermal heat pump market*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8203-6282>

Abbreviations

CAGR Compound Annual Growth Rate

EHPA European Heat Pump Association

IDEA Institute for Diversification and Energy Saving

BHE Borehole Heat Exchangers

DTH Down The Hole drilling technique

1U, 2U Configuration of heat exchanger with one, respectively two loops made of polypropylene pipe

PV photovoltaic

HVAC Hybrid Heating, Ventilation, and Air-Conditioning

The global geothermal heat pump market has grown significantly in recent years. It is projected to grow from \$4.73 billion in 2025 to \$5.08 billion in 2026 (Fig. 1.). Important factors for this growth are rising energy prices, government incentives for renewable energy, adoption of sustainable building practices, and reduction of carbon emissions.

For Europe, 2025 ended with a total of 2.63 million residential heat pumps sold, compared to 2.38 million registered in 2024 across 14 European countries (Table 1). With these figures, the total number of heat pumps in Europe is 28 million of units.

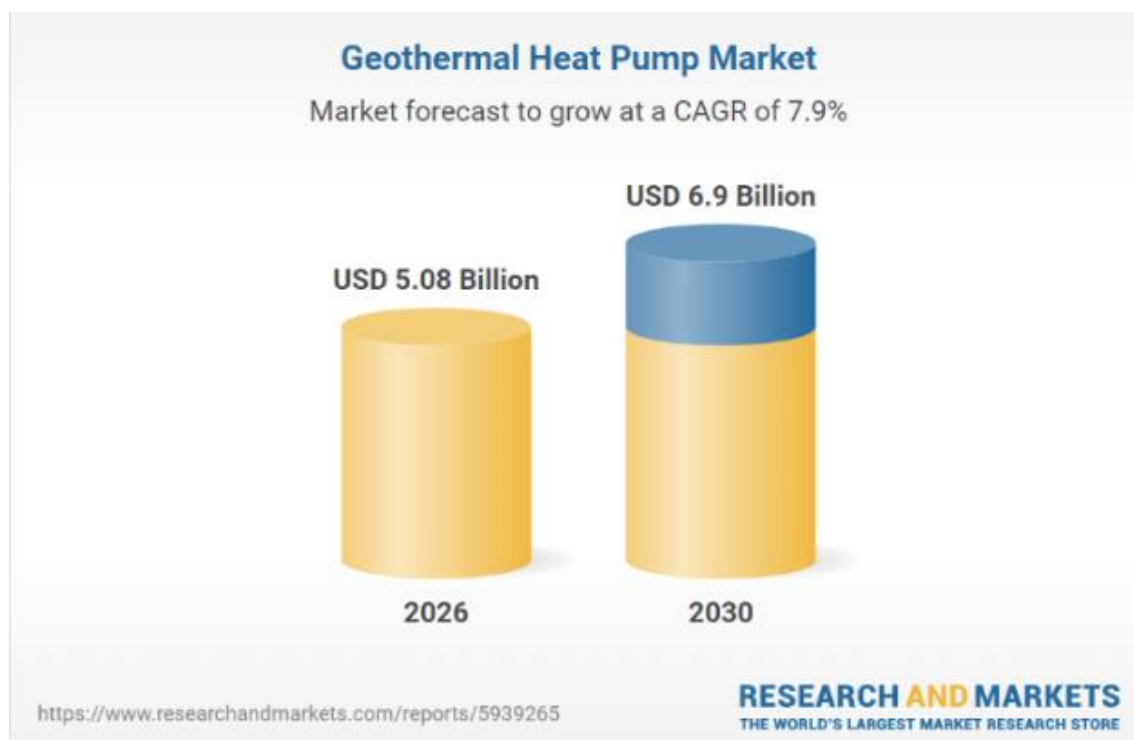


Fig. 1. Global Geothermal Heat Pump Market. [1]

According to a report published by EHPA, twelve of sixteen countries analyzed installed more heat pumps in 2025 than in 2024. Only Austria, France, Norway and Poland have registered a decrease over this period.

Table 1. Dynamics of sales of heat pumps by type, EU, 2024-2025 [2]

Technology	2024	2025	Percentage evolution
Air-to-air	1 026 325	1 125 134	9,6 %
Air-to-water	879 844	1 002 067	13,9 %
Geothermal (heat pump)	100 489	115 573	15,0 %
Other	62 412	65 656	5,2 %
Domestic hot water	313 205	324 492	3,6 %
Total	2 382 275	2 632 922	10,5%

By type, in EU geothermal heat pumps have experienced the greatest growth (15%).

The Spanish heat pump market is among the top five in the European Union according to forecasts for 2027 and is expected to grow by 3.66% by 2027.

Table 3. Heat pump sales in Spain [3]

	2022	2024	2025
Sales of heat pumps	184 950	198 000	228 000
Stock of heat pumps	1 280 000	1 698 700	1 926 700

Heat pump sales in Spain have been increased by +15% in 2024 compared to 2025 (Table 3).

Table 2. Heat pumps by sector, Spain, 2023 [4]

Sector	Number of installations	Thermal potential (kW)	Hours	Thermal production (toe)	SPF	Electricity consumption (MWh)	Energy Consumption (toe)
Food, beverages and tobacco	3	484	3,101	12.920	6	262	107
Not specified in other categories – Industry	17	957	1,815	14.938	5	348	119
Wood and wood products	1	16	1,34	184	5	4	2
Financial and insurance activities and real estate activities	8	1,213	1,792	18.691	6	375	155
Trade, repair of motor vehicles and motorcycles	40	11,78	1,911	1.932,40	5	4,52	1,544
Homes	3,919	91,518	1,393,	10.965,72	5	26,311	8,703
Trade and public services	44	6,799	1,701	99.484	5	2,363	792
Construction	4	183	944	1.483	5	35	12
Paper pulp, paper and graphic arts	1	376	1,627	5.263	5	128	42
Not specified in other categories Energy sector	1	2,014	1,34	23.209	5	545	185
Metallurgy	4	951	5,184	42.404	6	821	353
Non-ferrous metal industries	1	103	1	885	6	18	7
Machinery	1	70	1,34	807	5	18	7
Postal and courier activities	1	247	2,082	4.422	6	86	37

Sector	Number of installations	Thermal potential (kW)	Hours	Thermal production (toe)	SPF	Electricity consumption (MWh)	Energy Consumption (toe)
Accommodation services	78	21,666	1,376	2.563,19	6	5,113	2,124
Food and beverage services	3	100	1,941	1.669	5	37	14
Administrative activities and support services	4	226	1,892	3.683	5	93	29
Public administrations and defense, compulsory social security	80	16,621	1,562	2.232,36	5	5,742	1,739
Education	41	16,538	1,92	2.730,67	5	6,991	2,13
Health activities and social services	24	13,173	2,592	2.936,87	5	6,298	2,395
Other services and public services	133	24,982	1,785	3.934,72	5	9,26	3,039
Storage and transport-related activities	2	361	2,022	6.283	4	167	49
Agriculture	11	661	2,26	12.841	5	310	102
Other unspecified activities	145	8,24	1,861	1.318,60	5	2,943	1,066
Totals	4,566	219,259	44,782	28.762,976	125	72,788	24,752

In total, in Spain in 2023 there were 5 million 943 thousand 228 aerothermal, hydrothermal and geothermal installations (thermal potential – 40.867,861 kW).

Of these, the share of geothermal is only 4 thousand 566 pieces (thermal potential – 219,259 kW). Of these mentioned 3919 – were installed in households, and only 647 – in industry and services (Table 2).

By region, the largest total capacity of heat pumps is in the Comunidad de Madrid (48,298.52 kW), followed by Aragon (43,292.76 kW), the Basque Country (32,112.71 kW), Galicia (14,231.62 kW) and Catalonia (14,135.91 kW) [5].

Table 4. Features of Ground Source Heat Pumps in EU's countries [6]

Country	Average depth of (BHE), m	Major types of circulation media	Typical borehole diameter, mm	General cost of the installation per meter (EUR/m)	Heat exchanger diameters	Average number of inlet and outlet wells (open loop system)	The legislation about acquiring new statistical data for market analysis
Sweden	200	ethyl alcohol water solution in bio-quality	114 mm most common, sometimes 139 mm	30 – 32 for drilling (collector, ground install, digging not included)	Single U 40,45 and 50 mm, sometimes Double U32	No data	Svenska Kyl&Värmepumpsföreningen, (SKVP) and partly Rototec. Svenskt Geoenergicentrum a part of drillers association Borrföretagen

Country	Average depth of (BHE), m	Major types of circulation media	Typical borehole diameter, mm	General cost of the installation per meter (EUR/m)	Heat exchanger diameters	Average number of inlet and outlet wells (open loop system)	The legislation about acquiring new statistical data for market analysis
Netherlands	175	pure water + propylene glycol water solution + ethylene glycol water solution (in equal proportions)	140-180	25 – 35	Single U probes dia.32-40 mm, mainly PE-RC	2-3	The Netherlands Central Buro of Statistics (CBS)
Ireland	150	pure water + propylene glycol water solution + ethylene glycol water solution (in equal proportions)	152	56 – 62 (drilling probe and grouting)	PE100-single U40	No data	Sustainable Energy Authority of Ireland for grant subsidised systems Heat Pump Association of Ireland for general HP unit sales (excludes the subsurface element of the system) The Geothermal Association of Ireland – collection of mostly large-scale commercial systems by type, installed capacity, and estimated energy produced GeoScience Regulatory Office (GSRO) – will be mandated with data collection and statistics under the new upcoming licensing and regulatory framework
Poland	120	propylene glycol water solution (25%) + ethylene glycol water solution (75%)	- 110 for DTH - 136-142 (1U) and 162-186 (2U) for sediments	35 (drilling, grouting, probe and glycol)	Single U probes dia.40 mm, mainly PE-RC	2+2	Polska Organizacja Rozwoju Technologii Pomp Ciepła (PORT PC) Stowarzyszenie Producentów i Importerów Urządzeń Grzewczych (SPIUG) in Poland Polish Geological Institute - National Research Institute (PIG-PIB) is in charge of the database "Other geological documentation". The all works in Poland can be identified by the Geological Works Project, which in most cases stays in the Municipalities

Country	Average depth of (BHE), m	Major types of circulation media	Typical borehole diameter, mm	General cost of the installation per meter (EUR/m)	Heat exchanger diameters	Average number of inlet and outlet wells (open loop system)	The legislation about acquiring new statistical data for market analysis
Germany	109	pure water (5%) + ethylene glycol water solution (95%)	152 to 168 igneous – 178 and more for sedimentary rocks	90 – 130 (drilling, probe and grouting)	Double U32	1+1	Geological surveys and Water authorities in Germany Bundesverband Wärmepumpe (BWP) in Germany Waermepumpen Angebotsvergleich in Germany Manufacturers for the HP, e.g. Vaillant, also non-European companies (China)
Austria	107	pure water (10%) + propylene glycol water solution (10%) + ethylene glycol water solution (80%)	152 or 168	70 – 80 for singular family homes (lower costs for bigger installations)	Double U32	1+1	"Water registry" of each county in Austria "Baugrundkataster" - the registry of all drillings in separate counties in Austria
France	100	pure water + propylene glycol water solution + ethylene glycol water solution (in equal proportions)	145 or 165	100	Double U32	1+1	No data
Spain	100	pure water (80%) + propylene glycol water solution (10%) + ethylene glycol water solution (10%) *	110-150	75 – 85 boreholes complete (borehole, probe and backfill) (without lost casing)	Double U32	1+1	I Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE) de Españaes The Spanish Geothermal Technology Platform (GEOPLAT)

* Spain has been characterized by generally higher ground temperatures compared to other parts of Europe. In areas where ground temperatures range between 15-20°C, antifreeze is often not used and plain water is used as the circulating medium. In colder regions of Spain where ground temperatures drop below 15 degrees, the use of antifreeze is recommended.

In Spain, the legislative area for acquiring statistical data for market analyses varies significantly across different regions. Unlike other countries that maintain a public database for geothermal installations, Spain lacks a centralized, publicly accessible repository for the records of geothermal installations.

This absence of unified database presents challenges for market analysis, requiring navigating a diverse array of administrative processes specific to each region. The decentralize part of this legislative environment shows a certain need for more coordinated approach to data collection as well as sharing to support the growth and sustainability of Spain's geothermal energy sector [6].

Hybrid geothermal-PV systems are becoming increasingly popular in Spain and are also seen as a strategic opportunity to increase the presence of geothermal energy in the HVAC market. Recent studies confirm the potential effectiveness of such combinations: hybrid geothermal-PV and geothermal+aerothermal-PV installations making it possible to combine the stability of geothermal energy with the high productivity of solar energy during the daytime [7].

The institute GEO3BCN-CSIC is implementing the Building Decarbonization Project with Geothermal Energy + Aerothermal Energy and Photovoltaic Hybridization. The geothermal energy production and collection system will include 19 vertical geothermal wells 120 meters deep with a double probe MUOVITECH or equivalent PN16 PE-100 SDR11 Ø32×3.0 mm (4×Ø32 mm) with "microfin turbo collector" technology and a RHOSS EasyFLOW ECO HT series water-to-water geothermal heat pump or equivalent. Its maximum capacity will be 215.7 kW for heating and 193.2 kW for cooling.

According to the data of the Almera-1 Well (depth 214 meters), a constant average soil temperature of approximately 15.5°C has been established throughout the well. The rocks are mainly shales, clays, siltstones.

The operation area of the climate-controlled premises is 1381.94 m². The expected duration of the work is 3 months (up to 12 weeks).

REFERENCES

1. <https://www.researchandmarkets.com/reports/5939265/geothermal-heat-pump-market-report?srsId=AfmBOoqzA7s3Gmr0x1EUdQTfI02PlnnlfUg9aVo1sR6q6ouvIUW7tuS>
2. <https://climatizacion-y-confort.cdecomunicacion.es/noticias/energias-renovables/154449/las-ventas-de-bombas-de-calor-crecen-un-11-en-europa-en-2025>
3. <https://www.ehpa.org/wp-content/uploads/2025/07/EHPA-Market-Report-2025-executive-summary.pdf>
4. <https://geotermiaonline.com/14507/las-bombas-de-calor-siguen-su-racha-de-crecimiento/>
5. <https://www.iea-gia.org/our-members/geoplat>
6. <https://gogeothermal.eu/wp-content/uploads/2024/04/Geoboost-Deliverable-D2.1-Ground-Source-Heat-Pumps-in-Europe.pdf>
7. <https://udimundus.udima.es/handle/20.500.12226/3227>

УДК 620.92:697

АНАЛІЗ ТЕХНІЧНИХ ТА ЕКОНОМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕОТЕРМАЛЬНИХ СИСТЕМ ТЕПЛО- І ХОЛОДОПОСТАЧАННЯ З ПІДЗЕМНИМ АКУМУЛЮВАННЯМ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ

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*

У роботі проведено оцінку стану розвитку геотермальних систем тепло- і холодопостачання з підземним акумулюванням теплової енергії. Проаналізовано технічні та економічні характеристики основних типів таких акумуляторів.

Ключові слова: геотермальна енергія, теплопостачання, холодопостачання, підземне акумулювання теплової енергії

ANALYSIS OF TECHNICAL AND ECONOMIC CHARACTERISTICS OF GEOTHERMAL HEATING AND COOLING SYSTEMS WITH UNDERGROUND THERMAL ENERGY STORAGE

O. V. Lysak

*Institute for Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolozhichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (044) 206-28-09, e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com*

The paper assesses the state of development of geothermal heating and cooling systems with underground thermal energy storage (UTES). The technical and economic characteristics of the main types of UTES are analyzed.

Key words: geothermal energy, heating, cooling, underground thermal energy storage.

ORCID: 0000-0002-4934-0685.

Вступ. Однією з важливих сучасних задач є зменшення залежності від викопного палива шляхом переходу до відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). У сфері систем тепло- та холодопостачання одним із перспективних напрямів переходу на ВДЕ є використання геотермальної енергії.

Для ефективного використання геотермальних ресурсів доцільним є застосування систем підземного акумулювання теплової енергії (англ. Underground Thermal Energy Storage, UTES). Вони використовуються переважно для сезонного акумулювання [1], що дозволяє накопичувати доступну та дешеву енергію в один сезон для її подальшого споживання в інший.

Метою цієї роботи є оцінка стану розвитку геотермальних систем тепло- і холодопостачання з підземним акумулюванням теплової енергії, а саме їх технічних та економічних характеристик.

Аналіз технічних характеристик систем тепло- і холодопостачання з підземним акумулюванням теплової енергії. Огляд фахової літератури [1–7] показав, що в українській науковій термінології ще формується усталене понятійне позначення для класифікації типів UTES. Тому під час дослідження доцільно використовувати їхні загальноприйняті міжнародні аббревіатури англійською мовою:

- BTES (англ. Borehole Thermal Energy Storage) – акумулювання в масиві ґрунту за допомогою вертикальних свердловин для підведення або відведення теплової енергії залежно від потреб у тепло- та холодопостачанні;
- ATES (англ. Aquifer Thermal Energy Storage) – акумулювання, що використовує підземні водоносні горизонти як природний резервуар для накопичення теплоти чи холоду;
- PTES (англ. Pit Thermal Energy Storage) – акумулювання у штучно створеному резервуарі (озері або котловані), заповненому водою або сумішшю води з гравієм для накопичення теплоти.

У табл. 1 наведено порівняльні характеристики цих систем щодо їхніх геологічних та гідрогеологічних вимог, а також відносні показники густини акумулювання.

Таблиця 1. Характеристики систем тепло- і холодопостачання з підземним акумулюванням енергії верхніх шарів землі

Назва англійською	Геологічні та гідрогеологічні вимоги	Густина акумулювання теплоти
BTES	Можливо використовувати у більшості типів гірських порід та ґрунтів	Середня
ATES	Необхідний водоносний горизонт із характеристиками, що відповідають технічним розрахункам для підтримання режимів підведення та відведення енергії	Коливається від низької до високої залежно від температурного режиму
PTES	Встановлення не залежить від геологічних умов; потребує значних площ для створення системи	Висока

Аналіз економічних характеристик систем тепло- і холодопостачання з підземним акумулюванням теплової енергії. Економічна доцільність впровадження систем UTES визначається структурою капітальних (CAPEX) та операційних (OPEX) витрат [8,9]. Ці показники суттєво залежать від низки макроекономічних та регіональних факторів: рівня розвитку індустрії зі створення та експлуатації UTES, масштабів проекту, актуальних цін на матеріали, а також вартості виробничих та монтажних робіт у конкретній країні.

Більше того, коректна оцінка окупності вимагає порівняння з місцевими тарифами на традиційні енергоресурси. Цей процес ускладнюється в умовах штучного державного регулювання (субсидування) цін на енергоносії. Зокрема, у дослідженні [10] зазначається, що в поточних реаліях України окупність навіть базових теплонасосних систем без акумулювання може бути складною через високу вартість імпортного обладнання. За кордоном існують успішні приклади таких проектів — зокрема, масштабно впроваджені системи PTES у Данії, де вони успішно інтегровані в мережі централізованого теплопостачання, проте навіть там простий термін окупності становить близько 12 років [11].

Загалом, початкова вартість (CAPEX) систем UTES є високою, а її питоме зниження досягається за рахунок збільшення об'ємів акумулятора теплової енергії, а також адаптації проектних рішень до місцевих умов та тарифної політики.

Висновок. Технології підземного акумулювання (BTES, ATES, PTES) для систем геотермального тепло- та холодопостачання досягли необхідного рівня технічної зрілості для масового застосування. Проте їх широке комерційне впровадження суттєво залежить від економічних чинників, і на сучасному етапі період їхньої окупності залишається тривалим. Подальший розвиток цього напрямку потребує масштабування проектів для зниження питомих витрат, а також розробки дієвих механізмів регіональної підтримки та фінансового стимулювання.

ПОСИЛАННЯ

1. Лисак О. В. Аналіз системи центрального теплопостачання за використання сезонного геотермального акумулювання в комбінації з системою виробництва та споживання водню. Відроджувана енергетика. 2020. № 3(62). С. 70–88. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3\(62\).70-88](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.3(62).70-88)
2. Dahash A. et al. Advances in seasonal thermal energy storage for solar district heating applications: A critical review on large-scale hot-water tank and pit thermal energy storage systems. Applied Energy. 2019. Vol. 239. P. 296–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.189>
3. Лисак О. В. Аналіз умов впровадження сезонного геотермального акумулювання в системах сонячного централізованого теплопостачання. Відроджувана енергетика. 2021. № 3(66). С. 72–87. DOI: [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3\(66\).72-87](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2021.3(66).72-87)
4. Fleuchaus P. et al. Worldwide application of aquifer thermal energy storage – A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 94. P. 861–876. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.057>
5. Task 52. Solar Heat and Energy Economics in Urban Environments (IEA SHC). Technical Report Subtask C – Part C1: Classification and benchmarking of solar thermal systems in urban environments. International Energy Agency Solar Heating and Cooling Technology Collaboration Programme (IEA SHC TCP). 2016. URL: <https://task52.iea->

- shc.org/Data/Sites/1/publications/IEA-SHC-Task52-STC1-Classification-and-Benchmarking_v02.pdf (дата звернення: 10.01.2026).
6. Sifnaios I., Furbo S., Jensen A. R. Monitoring data of the Høje Taastrup water pit thermal energy storage. *Data in Brief*. 2025. P. 111305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.dib.2025.111305>
 7. Skarphagen H. et al. Design Considerations for Borehole Thermal Energy Storage (BTES): A Review with Emphasis on Convective Heat Transfer. *Geofluids*. 2019. Vol. 2019. P. 1–26. DOI: <https://doi.org/10.1155/2019/4961781>
 8. Herrmann M. et al. Capital costs of aquifer thermal energy storage (ATES): a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2026. Vol. 226. P. 116202. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116202>
 9. Akbar A., Majid M. A. B. A., Mokhtar A. A. Life cycle costing of thermal energy storage system using CAPEX and OPEX. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2021. Vol. 35, no. 7. P. 3223–3229. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0642-9>
 10. 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, no. 5. P. 1110. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18051110>
 11. Sørensen A. Feasibility, design, tendering, and monitoring for 70,000 m³ PTES in Høje Taastrup, Denmark. 2025. URL: https://iea-es.org/task-45/wp-content/uploads/sites/33/IEA-ES_Task45_Webinar2_Presentation_PTES_PlanEnergi_PerAlex-Sorensen.pdf (дата звернення 27.03.2026)

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДОБУТКУ ВОДИ ЗІ СВЕРДЛОВИНИ МЕТОДОМ «ГАЗЛІФТУ» ІЗ ЗВОРОТНЬОЮ ЗАКАЧКОЮ ВОДИ У СВЕРДЛОВИНУ

Ю. П. Морозов¹, О. В. Бачеріков², В. Г. Олійніченко³, А. В. Сорока⁴, В. В. Севрюк⁵,

Інститут відновлюваної енергетики НАН України

102094, м. Київ, вул. Г.Хоткевича, 20А,

тел./факс 206-28-09, e-mail: geotherm@ukr.net

Ключові слова: газліфт, (ерліфт), видобування води зі свердловини, напірно-розподільчий вузол, коаксіальний трубопровід

EXPERIMENTAL STUDIES ON THE EFFICIENCY OF WATER PRODUCTION FROM A WELL USING THE "GAS LIFT" METHOD WITH REVERSE WATER INJECTION INTO THE WELL

Yu. P. Morozov¹, O. V. Bacherikiv², B.G. Olynichenko³, A. Soroka⁴, V. Sevriuk⁵

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

¹ Doc. of Tech. Sciences. <https://orcid.org/0000-0002-0497-7439>

² Cand. of Tech. Sciences. <https://orcid.org/0000-0001-7085-7796>

³ <https://orcid.org/0000-0003-4651-9628>

⁴ пров. інж. <https://orcid.org/0009-0007-0388-57043>

Keywords: gas lift (early lift), water extraction from a well, pressure distribution unit, coaxial pipeline

Під терміном газліфт розуміють пристрій, призначений для підйому рідини з нижчого рівня на вищий за рахунок подачі стисненого газу. Оскільки у більшості практичних застосувань як робоче середовище використовується повітря, такі установки отримали назву ерліфтів, хоча в окремих спеціалізованих випадках можуть застосовуватися й інші гази.

Для роботи ерліфта необхідне лише стиснене повітря, яке подається компресором, що функціонує в умовах, які виключають його контакт із перекачуваною рідиною. Ця важлива особливість забезпечує можливість використання ерліфтів для підйому та транспортування проблемних за складом середовищ, зокрема високомінералізованих вод і грубодисперсних суспензій (піску, подрібненого вугілля тощо), незважаючи на нижчий коефіцієнт корисної дії порівняно з глибинними насосами [2].

Завдяки простоті конструкції, відносно низькій вартості, а також легкості забезпечення корозійної та абразивної стійкості, сфера застосування ерліфтів є досить широкою. У побутових умовах вони використовуються для видобутку води зі свердловин і очищення замулених свердловин. У комунальному господарстві ерліфти застосовуються на спорудах біохімічного очищення для транспортування ущільненого сирого осаду та надлишкового активного мулу насосами [1,3].

Врахування газліфту проводимо шляхом застосування критерію Архімеда [4]:

$$A_r = \frac{gl^3 \rho^2 (\rho_c - \rho_s)}{\mu^2 \rho_s},$$

Де μ – коефіцієнт динамічної в'язкості середовища, Па/с;

l – довжина, м

ρ_c – густина часинок, кг/м³;

ρ_s – густина середовища, кг/м³;

g – прискорення вільного падіння, м/с².

Переваги ерліфтного способу гідропідйому:

- простота конструкції;
- відсутність рухомих та обертових елементів;
- висока надійність і довговічність;
- простота експлуатації;
- здатність до саморегулювання;
- можливість транспортування рідин із високим вмістом твердих частинок;
- можливість підйому рідини на значну висоту.

Серед існуючих типів ерліфтів для реалізації було обрано схему з кільцевим підйомним каналом і внутрішнім повітропроводом. У цій конструкції повітря подається через внутрішню трубу, розташовану коаксіально відносно підйомної труби, тоді як газорідинна суміш рухається вгору кільцевим каналом.

Побудова ерліфта та його випробування

Ствол ерліфта виконано коаксіальним: зовнішня труба — поліетиленова (ПНД) діаметром 32 мм, внутрішня — полівінілхлоридна (ПВХ) діаметром 12 мм. Обрані розміри зумовлені характеристиками свердловини.

Напірно-розподільчий вузол ерліфта виготовлено зі стандартних поліетиленових і поліпропіленових фітінгів (див. рис. 1), що забезпечує їхню високу хімічну стійкість у воді з різними значеннями рН, а також мінімізує абразивне зношування та утворення біологічних і мінеральних відкладень.

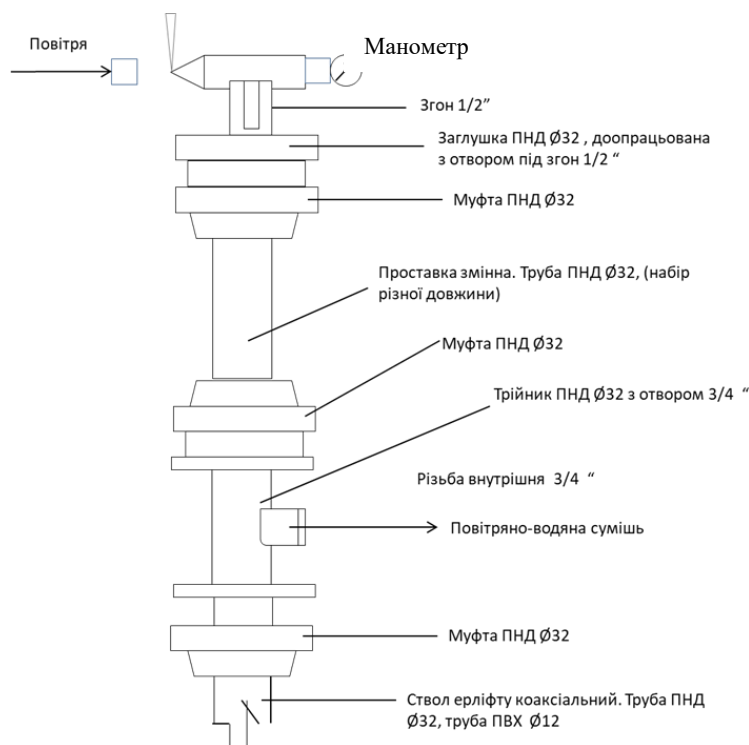


Рис. 1. Будова напірно-розподільчого вузла ерліфту

Під час експериментальних досліджень вимірюються такі параметри:

- тиск повітря в ресивері компресора;
- витрата повітря (за показами газового лічильника);
- тиск у повітропроводі після лічильника та манометра;
- продуктивність (витрата) води в усьому діапазоні подачі повітря при заданому тиску.

Передбачена можливість регулювання глибини подачі повітря відносно статичного рівня води у свердловині шляхом зміни довжини проставок у напірно-розподільчому вузлі ерліфта.

Схему ерліфта наведено на рис. 2.

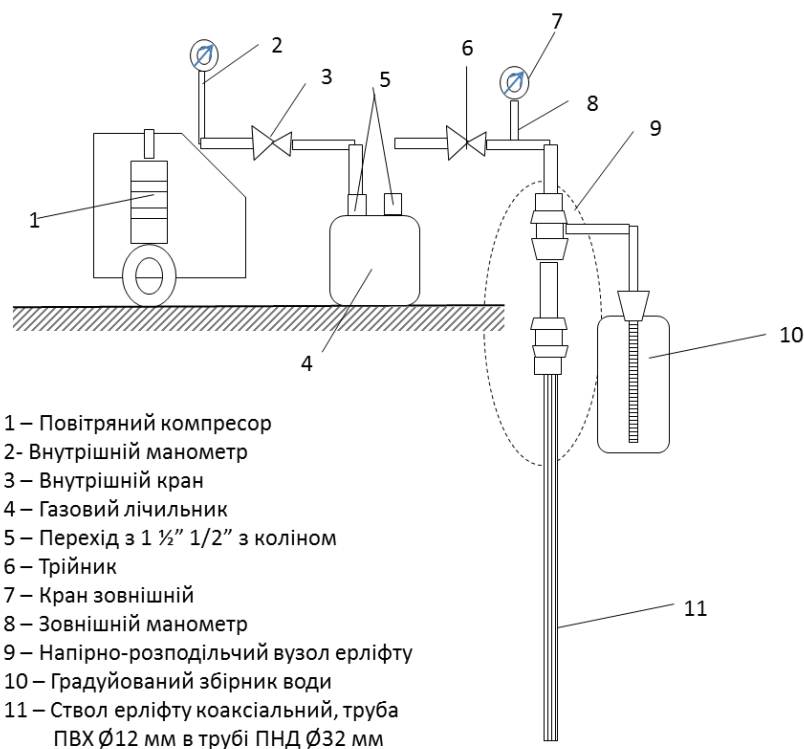


Рисунок 2 Схема ерліфту

Порядок проведення робіт

Монтаж і випробування ерліфта здійснюються у два етапи.

На першому етапі установка збирається зі ством довжиною 3 м. Ствол розміщується на висоті близько 3 м над рівнем землі та занурюється в ємність із водою. Після подачі стисненого повітря оцінюються принципова працездатність ерліфта та вплив регулювання параметрів на його роботу.

На другому етапі використовується ствол довжиною 50 м. Глибина занурення повітряної труби визначається на основі результатів попередніх випробувань і даних про статичний рівень води у свердловині.

ПОСИЛАННЯ:

1. Козыряцкий Л.Н., Федоров О.В. Коэффициент полезного действия гидравлических подъемных установок. Наукові праці ДонНТУ, вип.123, серія гірничо-металургічна, Донецьк, ДонНТУ, 2005.
2. Гейер В.Г., Логвинов Н.Г. «О свойствах безразмерных характеристик эрлифтов» // В кн. «Разработка месторождений полезных ископаемых» Киев, Техника, 1979.
3. Мазнев О.В. «Обгрунтування основних оптимальних параметрів ерліфтно-земснарядного комплексу для очищення від мулу внутрішніх водойм». Реферат за темою випускної роботи. ДонНТУ, кафедра енергомеханічних систем, 2014.
4. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973.

РАЦІОНАЛЬНІ СХЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ ТЕПЛОВОГО НАСОСА В ЦИКЛ КОНВЕКТИВНОГО СУШІННЯ

Н. О. Дабіжа¹, Т. В. Корінчевська², О. В. Гусарова³, Н. С. Малащук⁴

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Булаховського, 2, м. Київ, 03164, Україна,
тел.: (050) 906-41-28, e-mail: dabizha.nataliia@gmail.com*

Розглянуті процеси оброблення повітря в конвективних теплонасосних сушарках за різними схемами зневоднення теплоносія.

Ключові слова: конвективне сушіння, тепловий насос, рекуперація тепла, енергоефективність, питома енерговитрати.

RATIONAL SCHEMES FOR INTEGRATION OF HEAT PUMP IN CONVECTIVE DRYING CYCLE

N. O. Dabizha¹, T. V. Korinchevska², O. V. Husarova³; N. S. Malashchuk⁴

*Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine,
2 Bulahovskoho str., Kyiv, Ukraine, 03164
phone: (050) 906-41-28, e-mail: dabizha.nataliia@gmail.com*

The processes of air treatment in convective heat pump dryers with various schemes of drying agent dehumidification are considered.

Key words: convective drying, heat pump, heat recovery, energy efficiency, specific energy consumption.

ORCID: ¹0000-0001-6124-1981; ²0000-0002-6638-4743; ³0000-0001-7622-9168; ⁴0000-0002-8648-1006.

Сушіння нагрітим повітрям широко застосовується в різних галузях промисловості. Це складний теплотехнічний процес, під час якого одночасно відбуваються тепломасообмінні процеси з фазовим перетворенням – випаровуванням води (або іншого розчинника). Для видалення вологи необхідно підводити до матеріалу достатньо тепла, щоб забезпечити приховану теплоту пароутворення, яка для води становить 2501 кДж/кг при 0°C та 2256 кДж/кг при 100°C, що є термодинамічним бар'єром в заходах щодо зниження енергоспоживання сушарок. До того ж, до вологого матеріалу необхідно підвести теплоту на нагрівання та видалення зв'язаної вологи. Отже, сушіння є найбільш енергоємним з основних промислових процесів, на який припадає від 12% до 20% від загального споживання енергії в промисловості розвинених країн [1].

Енергетична ефективність (відношення витрат теплоти на випаровування до загальних витрат енергії) для конвективних сушарок складає 30-60%, а питома споживання енергії становить від 3600 кДж/кг до 9000 кДж/кг випаровуваної води [1]. Низька енергоефективність конвективних сушарок пов'язана з нераціональними втратами теплоти через стінки сушарки, на нагрівання конструкцій, а також з відпрацьованим вологим повітрям (більше 20% в загальному тепловому балансі), що призводить до теплового забруднення і викидів в оточуюче середовище водяної пари, яка відноситься до парникових газів.

За розрахунками, проведеними в ІТТФ НАН України [2], найбільші витрати енергії на сушіння зафіксовані в таких галузях промисловості України: у виробництві будівельних матеріалів (приблизно 2,1 млн т. у. п.), пиломатеріалів, деревини та сільськогосподарської біомаси (1,5 млн т. у. п.), вугілля та торфу (близько 1,4 млн т. у. п.), в АПК (близько 1,2 млн т. у. п.), в хімічній, фармацевтичній та целюлозно-паперовій промисловості тощо (0,4 млн т. у. п.). В підсумку на промислове сушіння витрачається 6,6 млн т. у. п. на рік, що супроводжується викидами в атмосферу 17,9 млн тонн водяної пари. Враховуючи, що до 30% витрат енергії на сушіння втрачається з відпрацьованим сушильним агентом, то теплове забруднення оточуючого середовища становить 1,98 млн т. у. п. або 58 ТДж. Таким чином, повітря, що йде з сушарки, має великий потенціал як джерело низькопотенційної вторинної енергії, яку необхідно утилізувати задля екологічності та підвищення енергоефективності сушіння.

Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності сушильного обладнання є оснащення конвективних сушарок енергозберігаючими системами підготовки сушильного агента з використанням теплонасосних циклів. Тепловий насос (ТН) за своїм принципом дії добре пристосований до інтеграції в процес конвективного су-

шіння, оскільки низькопотенційна теплота, яка необхідна для його роботи, утворюється в самій сушарці. Оснащення конвективної сушильної установки тепловим насосом дозволяє здійснювати утилізацію теплоти вологого повітря, що йде з сушарки, з наступним поверненням її в процес сушіння на більш високому температурному рівні.

В залежності від схеми підключення теплові насоси, які використовуються в конвективних сушарках, можливо розподілити на два типи – рекуперативні та конденсаційні (збездонючі). Рекуперативні теплові насоси застосовуються в сушарках, де має місце одноразове проходження повітря крізь висушуваний продукт і зазвичай використовуються при сушінні зерна. При цьому випарник ТН підключений до виходу вологого відпрацьованого повітря, а конденсатор – до входу свіжого повітря. Енергетична ефективність рекуперативного теплового насоса визначається величиною коефіцієнту перетворення (Coefficient of Performance, *COP*) та залежить від різниці температур між вхідним та вихідним потоками повітря. Недоліком такого типу сушарок є залежність ефективності їхньої роботи від вологовмісту атмосферного повітря, тому що тепловий насос нагріває, але не осушує повітря, що подається до сушарки. Другий тип – збездонючі теплові насоси, – використовуються в сушарках з замкнутою циркуляцією сушильного агента. Вилучення вологи з сушарки здійснюється шляхом охолодження вологого повітря і конденсації водяної пари на холодній поверхні випарника ТН, після чого осушений теплоносіть надходить на нагрівання до конденсатора ТН і повертається до сушильної камери. Показником ефективності збездонючого теплового насоса є питома інтенсивність вилучення вологи (Specific Moisture Extraction Rate, *SMER*), яка визначається як кількість випаровуваної з матеріалу вологи, що приходить на одиницю підведеної енергії. Ця схема підключення теплового насоса є найбільш перспективною для інтенсифікації процесів тепломасообміну при низькотемпературному зневодненні термолабільних матеріалів, оскільки забезпечує збільшення рушійної сили процесу за рахунок зниження вологовмісту сушильного агента та створює добре контрольовані умови зневоднення незалежно від стану навколишнього середовища [3].

З розрахунків питомих витрат теплоти за *H-d* діаграмою вологого повітря на процес сушіння в конвективній та теплонасосній сушарках відомо, що за рахунок утилізації теплоти конденсації вологи енерговитрати в останній зменшуються майже вдвічі. Слід зазначити, що в конденсаційних теплонасосних сушарках величина поточних енерговитрат значною мірою залежить від вологовмісту теплоносія і температурного режиму його зневоднення: з підвищенням вологовмісту енерговитрати на видалення вологи зменшуються. Тому додатковим резервом зменшення величини питомих енерговитрат є оптимізація технологічної підготовки теплоносія у теплового насосі, яка може бути здійснена за такими схемами. Схема А – підготовка з осушенням всього теплоносія. За цією схемою весь потік відпрацьованого теплоносія охолоджується у випарнику ТН. Схема Б – підготовка з осушенням частини теплоносія. За цією схемою частина зволоженого теплоносія осушується в випарнику теплового насоса і потім змішується з іншою неосушеною частиною. Ці дві схеми традиційно використовуються в теплонасосних сушарках. Схема В – підготовка з осушенням частини теплоносія з рекуперацією «холоду». За цією схемою після зволоження теплоносія в сушарці одна частина його охолоджується у випарнику ТН. Але при цьому холодний осушений потік, що йде з випарника, вступає в теплообмін в рекуперативному теплообміннику з потоком, що надходить на охолодження, після чого змішується з частиною вологого теплоносія і надходить на нагрівання до конденсатора ТН. Для цих схем були розраховані питомі енерговитрати на видалення вологи для певних тепловологічних параметрів теплоносія (температура 40 °С, вологовміст від 6 до 20 г/кг с.п.). Для схеми А енерговитрати склали від 0,75 до 0,5 кВт год/кг видаленої вологи. Для схеми Б – від 0,62 до 0,21 кВт год/кг. Для схеми В – від 0,5 до 0,2 кВт год/кг, що на 20-40% нижче енерговитрат за схемами А і Б [3, 4].

Висновки. Використання теплових насосів як теплогенераторів в конвективних сушильних установках дозволяє утилізувати теплоту відпрацьованого теплоносія і повернути її в процес сушіння на більш високому температурному рівні, що зменшує енерговитрати на процес конвективного сушіння в 2-3 рази в порівнянні з традиційними сушарками. Додаткове зниження витрат енергії на 20-40% можливе за рахунок оптимізації технологічного оброблення теплоносія в ТН.

ПОСИЛАННЯ

1. Handbook of Industrial Drying / Ed. A.S. Mujumdar. 4th ed. CRC Press, 2014. 1348 p.
2. Sniezhkin Yu.F, Petrova Zh.O. Energy Consumption and Environmental Aspects of Drying Processes. *Science and Innovation*. 2023. Vol. 19. №2. P. 44–55.
3. Sniezhkin Yu., Jian X., Chalaev D., Ulanov M., Dabizha N. Energy saving technologies for drying of heat-sensitive materials. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2019. Vol. 41. № 4. P. 5–12.
4. Snezhkin Yu., Chalaev D., Dabizha N. Analysis of energy performance of heat pump drying. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*. 2017. Vol. 39. № 3. P. 47–52.

УДК 620.92:631.371

ПОТЕНЦІАЛ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА БІОВОДНЮ

Г. О. Четверик¹, М. М. Жовмір²

^{1, 2}Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 02094, Україна

¹Тел.: (096) 912-2090, e-mail: ge_2002@yahoo.com

Розроблено метод визначення потенціалу біоводню з рослинної біомаси у територіальних громадах та метод прогнозування значення питомих показників валового збору сільськогосподарських культур під час переходу до меншого масштабу територіального поділу країни. Визначено технічно-досяжний потенціал біоводню з рослинної біомаси у територіальних громадах. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони необхідні для ідентифікації розміщення можливих проєктів зеленої водневої енергетики, відбору пілотних проєктів та прийняття управлінських рішень на місцевому рівні.

Ключові слова: потенціал, біоводень, рослинна біомаса, паливні гранули, синтез-газ

POTENTIAL OF AGROBIOMASS FOR PRODUCTION OF BIOHYDROGEN

H. Chetveryk¹, M. Zhovmir²

^{1, 2}The Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine,
50 Metrolohychna str., Kyiv, Ukraine, 02094

¹Phone: (096) 912-2090, e-mail: ge_2002@yahoo.com

A method for determining the potential of biohydrogen from plant biomass in territorial communities has been developed. A method for predicting the values of specific indicators of gross harvest of agricultural crops during the transition to a smaller scale of the territorial division of the country has been developed. The technically achievable potential of biohydrogen from plant biomass in territorial communities has been determined. The practical significance of the results obtained is that they are necessary for identifying the location of possible green hydrogen energy projects, selecting pilot projects and making management decisions at the local level.

Key words: pothential, biohydrogen, agrobiomass, fuel pellets, syn-gas

ORCID: ¹0000-0001-9398-1968, ²0000-0001-6514-7474

Для виробництва водню використовують здебільшого викопне паливо. З розвитком нових технологій з'являється можливість використання рослинної біомаси для виробництва водню, що сприяє зменшенню викидів парникових газів та вирішенню екологічних проблем у разі енергетичної переробки біомаси з отриманням відновлюваних газів.

Одним із способів отримання біоводню є парокиснева газифікація паливних гранул з подальшим відокремленням водню із синтез-газу. Рівень технічної досконалості проєктів газифікації або піролізу біомаси становить 7-9. Відомо, що, в країнах ЄС, в експлуатації перебуває 141 установка з газифікації біомаси і 54 установки на різних стадіях розробки або будівництва [1].

Найбільш поширеними ресурсами біомаси для газифікації є відходи сільськогосподарські та лісового господарства. З переходом до циркулярної економіки, деревна біомаса буде переважно використовуватись каскадно для виробництва будівельних матеріалів, хімічної продукції й товарів тривалого використання. У зв'язку з цим, ресурси деревини, доступної для енергетичного використання, скорочуватимуться. Тому доцільно вважати, що сировиною для отримання біоводню є паливні гранули, виготовлені з солом, стеблової маси та лушпиння таких сільськогосподарських культур, як пшениця, ячмінь, соя, ріпак, кукурудза та соняшник, які переважно вирощують в Україні.

Виконані дослідження присвячені питанню визначення потенціалу біоводню з агровідходів у територіальних громадах в умовах децентралізації країни. У відділі відновлюваних органічних енергоносіїв ІВЕ НАН України було розроблено метод визначення щорічного теоретичного та технічно досяжного потенціалу біоводню з агровідходів сільськогосподарської діяльності для територіальних громад з урахуванням тенденцій використання паливних гранул у сфері теплопостачання та з використанням методу прогнозування питомих показників валового збору сільськогосподарських культур під час переходу до меншого масштабу територіального поділу країни [2, 3].

Метод визначення потенціалу біоводню з агровідходів сільськогосподарської діяльності полягає в тому, що послідовно визначаємо: обсяги утворення агровідходів сільськогосподарських культур; обсяги виробництва паливних гранул, виготовлених з соломи, стеблової маси та лушпиння сільськогосподарських культур; обсяги виробництва біоводню способом термохімічного перетворення паливних гранул.

Обсяги утворення агровідходів сільськогосподарських культур визначали за залежністю, яка враховувала валовий збір зерна або насіння відповідної культури, коефіцієнти утворення відходів та втрати, які виникають під час збирання урожаю і транспортування соломи або рослинних відходів [2]

$$AB_i = BZ_i \cdot k_{\text{відх}, i} \cdot (1 - k_{\text{втр}, i}) \cdot k_{\text{ен}, i}, \quad (1)$$

де i приймає значення: 1 – лушпиння соняшнику; 2 – солома сої; 3 – солома пшениці; 4 – солома ячменю; 5 – солома ріпаку; 6 – стебел соняшнику; 7 – стебел кукурудзи;

BZ_i – валовий збір зерна/насіння відповідної культури, т/рік. Приймали згідно статистичних даних, наведених в статистичних збірниках Державної служби статистики України;

$k_{\text{відх}, i}$ – коефіцієнт утворення відходів;

$k_{\text{втр}, i}$ – коефіцієнт, що враховує втрати, які виникають під час збирання урожаю і транспортування соломи та рослинних відходів;

$k_{\text{ен}, i}$ – коефіцієнт енергетичного використання.

Наразі в Україні приблизно 500 виробників паливних пелет, переважно з деревини та лушпиння соняшнику, менше із соломи. Виробництво деревних пелет становить приблизно 400 тис. т на рік і 400 тис. т на рік – з лушпиння соняшнику та соломи [4]. Під час створення крупних виробництв біоводню виникне потреба в перевезенні сировини на значні відстані та її зберіганні. Транспортування агровідходів у вигляді тюкованої соломи через споживання моторних палив призводить до збільшення емісії парникових газів, але перевезення пелет на відстані понад 500 км характеризується сприятливішими показниками. Для зменшення витрат моторних палив і емісії парникових газів було прийнято, що в місцях утворення агровідходів з них вироблятимуть паливні гранули, які й будуть транспортувати до заводів з виробництва біоводню та інших споживачів.

Сировиною для отримання біоводню є паливні гранули, виготовлені з соломи, стеблової маси та лушпиння сільськогосподарських культур. Обсяги виробництва паливних гранул з агровідходів визначали за залежністю, яка враховувала обсяги утворення агровідходів сільськогосподарських культур, коефіцієнти втрат ваги під час сушіння та вмісту сміття [2]

$$\Pi_{AB} = \sum_{i=1}^7 \Pi_{AB, i} = \sum_{i=1}^7 AB_i \cdot k_{\text{суш}, i} \cdot k_{\text{см}, i}, \quad (2)$$

де $k_{\text{суш}, i}$ – коефіцієнт, що враховує втрату ваги при сушінні i -ої сировини. Приймали, що для лушпиння соняшнику

цей коефіцієнт рівний 1, а для соломи та стебел – 0,81, оскільки вміст води в соломі та стеблах становить 30 %. Солому збирають у повітряно-сухому стані з вмістом води 10-14 %, бо при вмісті води більше 20-22 %, вона буде псуватися при зберіганні. В осінній період стебла соняшнику та кукурудзи можуть заготовляти і з високим вмістом води для додавання до силосу або до субстрата біогазових реакторів;

$k_{\text{см}, i}$ – коефіцієнт, що враховує сміття в сировині. Приймали за 0,91.

Потенціал біоводню з агровідходів визначали за залежністю, яка враховувала обсяги виробництва пелет, вмісту сухої речовини в паливних гранулах, вмісту золи в сухій речовині, коефіцієнти термохімічного перетворення сухої речовини пелет на біоводень, втрати при очищенні синтез-газу [2]

$$BV_{AB} = \frac{f_{\text{CP}, \Pi} \cdot k_{\text{БВ}} \cdot k_{\text{оч}, \text{СГ}} \cdot k_{\text{вик}, \Pi}}{\rho_{\text{В}}} \sum_{i=1}^7 \Pi_{AB, i} \cdot (1 - f_{\text{з}, \text{CP}, i}), \quad (3)$$

де $f_{\text{CP}, \Pi}$ – вміст сухої речовини (CP) в паливних гранулах. Вміст води в пелетах має не перевищувати 10-12 %.

Приймали за 0,9 т CP/т;

$f_{\text{з}, \text{CP}, i}$ – вміст золи в сухій речовині паливних гранул. Вміст золи є незначним для деревних матеріалів, але є досить значним для соломи злакових культур – в середньому 5 %, для лушпиння соняшнику – до 4 %. Приймали за 5 % для соломи та стебел та 4 % для лушпиння соняшнику;

$k_{\text{БВ}}$ – коефіцієнт термохімічного перетворення сухої речовини паливних гранул у біоводень, т/т СР. Приймали за 0,1 т H_2 /т СР пелет згідно з опублікованими результатами робіт;

$k_{\text{оч, СГ}}$ – втрати при очищенні синтез газу. Рекомендовано використовувати значення 0,7;

$k_{\text{вик, ПГ}}$ – коефіцієнт, що враховує використання паливних гранул для теплопостачання або на експорт, приймали, що 50 % паливних гранул буде використано для виробництва біоводню;

$\rho_{\text{в}}$ – густина водню за нормальних умов, кг/м^3 . Приймали за 0,09 кг/м^3 .

Зважаючи на відсутність статистичних даних, для оцінки ресурсів біомаси в територіальних громадах запропоновано застосовувати просторову інтерполяцію Сібсона і, базуючись на наборі відомих даних для регіонів, прогнозувати значення питомих показників валового збору сільськогосподарських культур під час переходу до меншого масштабу територіального поділу країни.

Метод прогнозування значення питомих показників валового збору сільськогосподарських культур під час переходу до меншого масштабу територіального поділу країни полягає в тому, що послідовно виконуємо наступні дії: будуємо функціональну залежність, в якій аргументом є відносні географічні координати адміністративних центрів регіонів, яким ставимо у відповідність розраховані питомі значення валового збору сільськогосподарських культур; будуємо тривимірну інтерполяцію для всієї країни, використавши функцію INTERPXYZ у застосунку EXCELAB; знаходимо значення питомих значень валового збору сільськогосподарських культур для адміністративних центрів територіальних громад.

Питомий валовий збір сільськогосподарських культур Z залежно від відносних географічних координат визначали наступним чином. У разі, якщо відомі значення функції Z в N точках простору, тоді значення функції в новій точці x_{H} визначали за залежністю [5]

$$Z(x_{\text{H}}) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(x_{\text{H}}) \cdot Z(x_i), \quad (4)$$

де N – кількість точок, сусідніх з x_{H} ; $Z(x_i)$ – значення функції в точці x_i ;

$\lambda_i(x_{\text{H}})$ – вагова функція для точки x_{H} по відношенню до точок x_i .

Вагову функцію $\lambda_i(x_{\text{H}})$ визначали за залежністю [5]

$$\lambda_i(x_{\text{H}}) = \frac{A_i(x_{\text{H}})}{\sum_{i=1}^N A_i(x_{\text{H}})}, \quad (5)$$

де $A_i(x_{\text{H}})$ – відстань від точки x_{H} до сусідніх точок x_i .

Питомий показник валового збору j -ої сільськогосподарської культури залежно від загальної площі територіально-адміністративної одиниці для кожної точки адміністративних центрів регіонів обчислили за залежністю [2]

$$F_{i,j} = \frac{BZ_j}{S_{\text{заг},i}}, \quad (6)$$

де BZ_j і $S_{\text{заг},i}$ – валовий збір j -ої сільськогосподарської культури; загальна площа i -ої територіально-адміністративної одиниці.

Обсяги утворення лушпиння соняшника для територіальних громад визначали на основі розміщення крупних виробників соняшникової олії. Обсяги утворення соломи та стебел сільськогосподарських культур, обсяги виробництва паливних гранул та біоводню для територіальних громад визначали згідно методу (1) – (3).

Визначені обсяги доступних ресурсів біомаси для виробництва біоводню на сучасному етапі розвитку сільського господарства у територіальних громадах. З часом з укрупненням сільськогосподарських виробників, а далі з освоєнням сучасних технологій заготівлі стебел кукурудзи та з освоєнням технологій заготівлі стебел соняшника можна буде збільшити доступні ресурси до теоретичного потенціалу. Таким чином були встановлені заходи, які необхідні для того, щоб збільшити доступні ресурси до теоретичного потенціалу.

Так, загалом в Україні, обсяги утворення лушпиння соняшнику становлять 2,43 млн т, соломи – 33,88 млн т, стебел – 60,96 млн т, обсяги виробництва пелет можуть становити 72,1 млн т, щорічний теоретичний потенціал біоводню з агровідходів сільськогосподарської діяльності з урахуванням тенденцій використання паливних гранул у сфері теплопостачання може становити 24,73 млрд м^3 . Таким чином в Україні зосереджено значний потенціал біоводню.

Для розрахунку потенціалу паливних гранул у територіальних громадах на відміну від методики розрахунків потенціалу твердого біопалива в регіонах країни було враховано розташування переробних підприємств насіння соняшника. В роботах [2, 3] наведено фактичне розташування крупних виробників соняшникової олії, визначено обсяги виробленої соняшникової олії та розрахункові обсяги утворення лушпиння. На рис. 1 зображені обсяги утворення лушпиння соняшнику, соломи, стебел, а на рис. 2 показано потенціал біоводню з паливних гранул, вироблених з лушпиння соняшнику, соломи, стеблової маси в деяких територіальних громадах Вінницької області.



Рис. 1 – Обсяги біоенергетичних ресурсів (тис. тон):

● – солома, ● – стебла, ● – лушпиння



Рис. 2 – Потенціал біоводню (млн. м³):

● – технічно досяжний, ● – теоретичний

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що вони необхідні для створення інтерактивної карти територіального розподілу ресурсів зеленого водню, ідентифікації розміщення можливих проектів зеленої водневої енергетики, відбору пілотних проектів та прийняття управлінських рішень на місцевому рівні.

Висновки. Розроблено метод прогнозування щорічного технічно досяжного потенціалу біоводню з агровідходів сільськогосподарської діяльності для територіальних громад України з урахуванням тенденцій використання паливних гранул у сфері теплопостачання. Визначені обсяги доступних ресурсів біомаси для виробництва паливних гранул на сучасному етапі розвитку сільського господарства у територіальних громадах. Встановлені заходи, які необхідні для того, щоб збільшити доступні ресурси до теоретичного потенціалу.

ПОСИЛАННЯ

38. Lundgren J., et al. Biomass gasification for hydrogen production. *IEA Bioenergy*, 2025. 50 p
39. Четверик Г.О., Жовмір М.М., Яременко О.А. Потенціал біоводню з агровідходів в територіальних громадах // *Відновлювана енергетика*, 2025. №4. С. 312-329. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4\(83\).312-329](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2025.4(83).312-329)
40. Звіт НДР "Визначення технічного потенціалу та створення інформаційного забезпечення видобутку "зеленого" водню з використанням відновлюваних джерел енергії для забезпечення України в повоєнний період тепловою а електричною енергією та збереження і відновлення довкілля", 1 етап. – К.: *Інститут відновлюваної енергетики НАН України*, 2025. Номер Державної реєстрації 0125U000212
41. Пелетна асоціація України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://pellet-association.com.ua>
42. Sibson R. A brief description of natural neighbor interpolation. *Interpreting Multivariate Data* – John Wiley and Sons: New York, 1981. Pp. 21–36

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ СИСТЕМИ ПІРОЛІЗНИЙ ПАЛЬНИК – ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИЙ ГЕНЕРАТОР

Ю. М. Лобунець¹, Г. О. Четверик², А. В. Сорока³

^{1, 2, 3}Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 02094, Україна

²Тел.: (096) 912-2090, e-mail: ge_2002@yahoo.com

Поліпшено конструкцію існуючих піролізних пічок за рахунок підігріву та удосконалення подачі вторинного повітря, що дало можливість ефективно спалювати піролізний газ. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що піролізна піч є універсальною за призначенням, крім опалення приміщення, за потреби вона може або використовуватись для приготування їжі або бути оснащена термоелектричним генератором для виробництва електроенергії. Проведено випробування мікросистеми з комбінованого виробництва теплоти та електроенергії в складі піролізного пальника та термоелектричного генератора. Визначено розподіл температури в камері згоряння та на поверхні «гарячої» сторони термоелектричного генератора, ЕРС, напруги та потужності ТЕГ залежно від тривалості експеримента за умови як періодичного так і безперервного завантаження палива в піролізну пічку.

Ключові слова: піролізна піч, термоелектричний генератор, дрова паливні, піроліз

EFFICIENCY OF USING THE SYSTEM: PYROLYSIS BURNER – THERMOELECTRIC GENERATOR

Yu. Lobynetz¹, H. Chetveryk², A. Soroka³

^{1, 2, 3}The Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine,
50 Metrolohychna str., Kyiv, Ukraine, 02094

²Phone: (096) 912-2090, e-mail: ge_2002@yahoo.com

The design of existing pyrolysis furnaces has been improved by heating and improving the supply of secondary air, which made it possible to effectively burn pyrolysis gas. The practical significance of the results obtained is that the pyrolysis furnace is universal in purpose, in addition to heating the room, if necessary, it can either be used for cooking or be equipped with a thermoelectric generator for electricity production. A microsystem for combined heat and power generation consisting of a pyrolysis burner and a thermoelectric generator was tested. The temperature distribution in the combustion chamber and on the surface of the "hot" side of the thermoelectric generator, EMF, voltage and TEG power were determined depending on the duration of the experiment under the condition of both periodic and continuous fuel loading into the pyrolysis furnace.

Key words: pyrolysis burner, thermoelectric generator, firewood, pyrolysis

ORCID: ¹0000-0001-9398-1968, ²0000-0002-3593-1687, ³0009-0007-0388-5704

Піч на дровах «буржуйка» традиційно слугувала для обігріву приміщень різного призначення, використовувалась масово і не вимагала спеціальних знань для обслуговування. Цей вид печей зазнав безліч змін, і сучасні печі більш екологічні та енергоефективні. Пошук нових рішень спалювання твердого палива за рахунок удосконалення традиційних конструкцій піролізних печей є актуальним.

У відділі відновлюваних органічних енергоносіїв дослідили питання пов'язані з використанням малогабаритних пічок для обігріву приміщень у місцях, де відсутнє опалення. Вони можуть виконувати роль резервного джерела теплової енергії в енергетичних системах з відновлюваними джерелами енергії. Піролізна піч є універсальною за призначенням, за потреби вона може або використовуватись для приготування їжі або бути оснащена портативним термоелектричним генератором для виробництва електроенергії.

Експериментально дослідили ефективність використання піролізної пічки. На рис. 1 зображено загальний вигляд стенду для проведення експериментальних досліджень. Поліпшено конструкцію існуючих піролізних пічок за рахунок підігріву та удосконалення подачі вторинного повітря, що дало можливість ефективно спалювати піролізний

газ. Забезпечили ефективне спалювання піролізного газу та підвищення ККД піролізної пічки шляхом підігріву вторинного повітря. Встановлено, що ККД піролізної пічки становить понад 80 %. Таким чином удосконалили подачу вторинного повітря та забезпечили ефективне спалювання піролізного газу та підвищили ККД піролізної пічки шляхом підігріву вторинного повітря. Було знижено співвідношення між вагою піролізної печі й вагою дров паливних до 1:1 за рахунок використання тонколистової термостійкої нержавіючої сталі для її виготовлення та оптимізації розмірів пічки, що дає змогу покращити економічні показники використання піролізних пічок для опалення приміщень. За цим показником піч не має аналогів в Україні. Енергоефективність печі була підвищена завдяки використанню труб-радіаторів для димаря всередині приміщення.

Визначено, що при завантаженні паливом 10-12 кг і використанні піролізної печі в режимі печі тривалого горіння, тривалість роботи піролізної печі складає приблизно 5 год, а теплова потужність печі становить приблизно 8 кВт. За умови інтенсивного згоряння палива, тривалість роботи піролізної печі складає приблизно 3 год, а теплова потужність печі становить приблизно 16,2 кВт [1].

Проведено випробування мікросистеми з комбінованого виробництва теплоти та електроенергії в складі піролізного пальника «ПП-8» (розробка ІВЕ НАН України) та термоелектричного генератора «Алтек 8047» (розробка Інституту термоелектрики НАН України і МОН України). На рис. 2 зображено розміщення термоелектричних модулів у термоелектричному генераторі «Алтек» та в розробленому ТЕГ у відділі відновлюваних органічних енергоносіїв.



Рис. 1 – Загальний вигляд стенду для проведення експериментальних досліджень

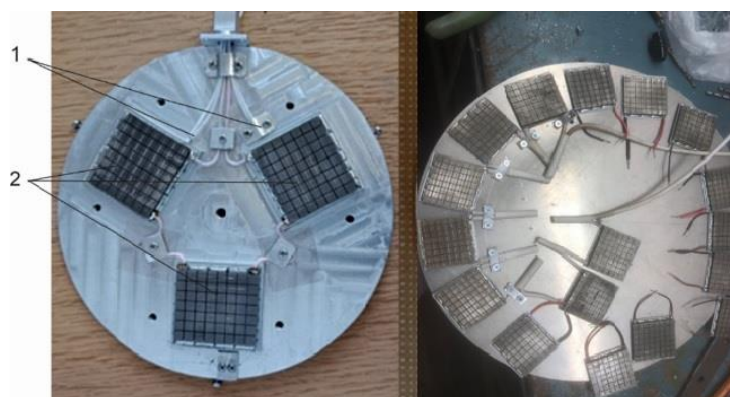


Рис. 2 – Розміщення термоелектричних модулів: зліва – в термоелектричному генераторі «Алтек» (3 модулі); справа – в розробленому ТЕГ (18 модулів)

Досліджено теплофізичні характеристики системи, визначено умови узгодження параметрів пальника та термоелектричного генератора.

На рис. 3 зображено графік зміни температур в камері згоряння піролізної печі та температури димових газів залежно від тривалості експеримента за умови безперервного завантаження палива у міру його вигорання в піролізній пічці.

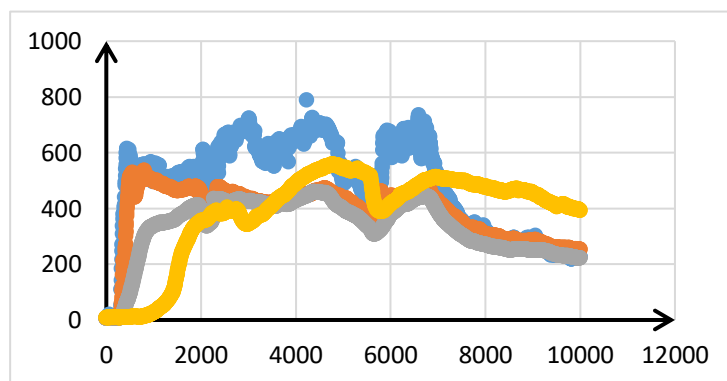


Рис. 3 – Динаміка температур для піролізної печі:
синій колір – в камері згоряння; жовтий колір – димові газы (температура в °C, тривалість горіння в сек.)

На рис. 4 зображено розподіл температури в камері згоряння T_b , температури на поверхні «гарячої» сторони ТЕГ t_h , ЕРС, напруги та потужності ТЕГ залежно від тривалості експеримента. Отримані результати експериментів дають

підставу зробити висновок, що паливник «ПП-8» здатен забезпечити функціонування ТЕГ типу «Алтек» для 18 модулів, при цьому потужність становить від 50 Вт_{ел} протягом усього часу роботи піролізної печі в безперервному режимі за умови інтенсивного згоряння палива, робочий цикл одного завантаження палива становить приблизно 3 год, пікова потужність термоелектричного генератора може становити до 120 Вт_{ел} [2, 3].

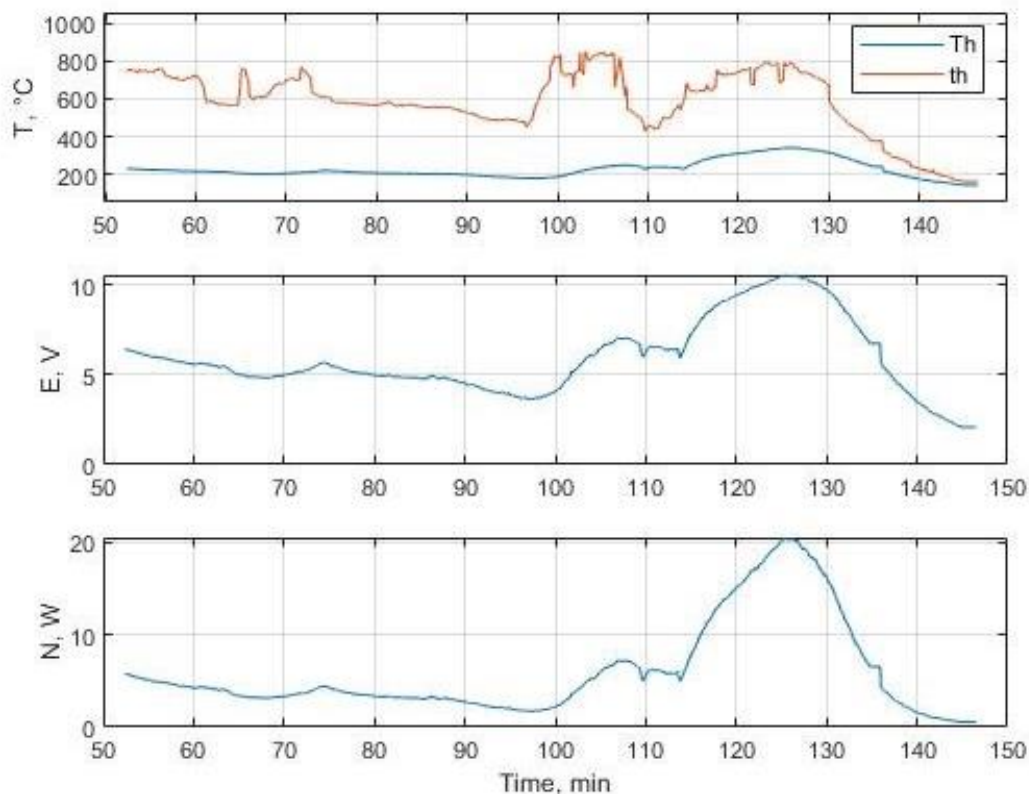


Рис. 4 – Розподіл температур t_h , T_h , ЕРС, напруги, E та потужності генератора, N

Висновки. Проведені випробування мікросистеми з комбінованого виробництва теплоти та електроенергії в складі піролізного паливника. Показано, що отримані результати експериментів дають підставу зробити висновок, що паливник «ПП-8» здатен забезпечити функціонування ТЕГ типу «Алтек» для 18 модулів, при цьому потужність становить від 50 Вт_{ел} протягом усього часу роботи піролізної печі в безперервному режимі за умови інтенсивного згоряння палива, робочий цикл одного завантаження палива становить приблизно 3 год, пікова потужність термоелектричного генератора може становити до 120 Вт_{ел}.

ПОСИЛАННЯ

1. Лобунець Ю.М., Ключ В.П., Четверик Г.О., Зур'ян О.В. Експериментальні дослідження характеристик піролізного паливника для термоелектричного генератора енергії // Відновлювана енергетика, 2025. №4. С. 152-158. [https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4\(79\).152-158](https://doi.org/10.36296/1819-8058.2024.4(79).152-158)
2. Lobunets Yu., Klius V., Chetveryk H., Rozver Yu., Havryliuk M., Konstantynovych I. Combined source of thermal and electrical energy based on a pyrolysis burner and a universal thermoelectric generator // *Термоелектрика*. № 4. 2025. С. 82-92. <https://doi.org/10.63527/1607-8829-2025-4-82-92>
3. Звіт НДР "Визначення технічного потенціалу та створення інформаційного забезпечення видобутку "зеленого" водню з використанням відновлюваних джерел енергії для забезпечення України в повоєнний період тепловою а електричною енергією та збереження і відновлення довкілля", 1 етап. – К.: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2025. Номер Державної реєстрації 0125U000212

АЛЬТЕРНАТИВНЕ ПАЛИВО НА ОСНОВІ ВІДХОДІВ РОСЛИННОЇ БІОМАСИ

Т. В. Корінчевська¹, В. А. Михайлик²

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Булаховського 2, м. Київ, 03164, Україна,
тел.: (044)424-12-26, e-mail: tvkorin@gmail.com

Досліджено термічні властивості відходів рослинної біомаси з метою створення альтернативного композитного палива на основі сільськогосподарських і побутових відходів. Запропоновано технологію одержання композитного палива.

Ключові слова: термічний аналіз, паливо, біомаса, сільськогосподарські відходи, технологія одержання.

ALTERNATIVE FUEL BASED ON PLANT BIOMASS WASTE

T. V. Korinchevska¹, V. A. Mykhailik²

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 thermal properties of plant biomass waste were investigated with the aim of creating an alternative composite fuel based on agricultural and municipal waste. A technology for producing composite fuel has been proposed.

Key words: fuel, municipal solid waste, peat, thermal analysis, calorific value.

ORCID: ¹0000-0002-6638-4743; ²0000-0003-2712-1382.

Біомаса має значний потенціал для розширення виробництва електроенергії та теплоти, а використання біомаси як палива дозволить зменшити викиди парникових газів та поліпшити екологічний стан довкілля. До найбільш поширених джерел біомаси можна віднести деревину та її відходи після обробки та переробки, відходи сільськогосподарського виробництва (зокрема соломі зернових культур, стебла кукурудзи та соняшнику, лушпиння соняшнику, лузгу гречки тощо) та спеціально вирощені енергетичні культури (вербу, тополя, міскантус тощо). Найбільшого розвитку набуло використання біоенергетичних ресурсів завдяки доступній та дешевій сировинній базі, значною часткою якої є відходи лісозаготівлі та деревообробки, а також відходи сільського господарства.

Оскільки Україна – аграрна країна, то перспективним джерелом біомаси є пожнивні рештки сільськогосподарських культур, що залишаються після збору урожаю. Тому перспективним напрямком виробництва альтернативного палива є розробка технології виготовлення композитного палива на основі сільськогосподарських відходів. При цьому величезне значення має вибір відповідної сировини та ефективної технології виробництва високоякісного продукту з мінімальним впливом на навколишнє середовище. Розглядаючи відходи сільського господарства, можна зосередитись на поширених в Україні культурах – соняшнику та кукурудзі.

Пожнивні рештки кукурудзи – перспективний вид біомаси, що має значний ресурс в Україні та світі, так як кукурудза – одна з найпоширеніших сільськогосподарських культур у світі та має співвідношення решток до зерна вище, ніж у інших зернових. Пожнивні рештки соняшнику також мають значний потенціал для використання у біоенергетиці, а оскільки Україна є світовим лідером за обсягами виробництва соняшнику, тому його пожнивні рештки доцільно переробляти в альтернативне паливо. Характеристики стебел соняшнику і кукурудзи залежать від місця вирощування, періоду збирання, кліматичних умов, ґрунту та добрив. При спалюванні їх як палива також потрібно враховувати, що сполуки хлору, що містяться в стеблах соняшнику можуть викликати корозію металевих елементів енергетичного обладнання [1, 2].

З метою створення альтернативного композитного палива було проаналізовано термічні характеристики стебел кукурудзи та соняшнику. Дослідження проведено в модернізованому в ІТТФ НАН України дериватографі «Q-1000» системи Paulik-Paulik-Erdey (фірма „MOM”, Угорщина), в якому реалізуються методи термогравіметрії та диференціального термічного аналізу.

Деструкційні зміни при термічному розкладанні стебел кукурудзи відбуваються в декілька етапів і мають кінетику, яка характерна рослинній сировині [3]. На першому етапі спостерігається дегідратація матеріалу, яка завершується за 127 °С. Максимальна швидкість зневоднення реєструється за 72 °С. Розкладання органічних речовин відбувається в інтервалі 127 – 503 °С і має виражені 2 стадії. На першій стадії до 351 °С стрімко деградує геміцелюлоза. Через потужне виділення газоподібних речовин відмічається різка зміна маси та висока середня швидкість розкладання матеріалу. На другій стадії (351 – 503 °С) в основному деградує целюлоза, середня швидкість розкладання матеріалу зменшується. Незважаючи на зменшення швидкості розкладання в другій стадії генерація теплоти дещо зростає (через більш вищу теплотворну здатність целюлози в порівнянні з геміцелюлозою [4]). Подальше нагрівання в інтервалі 503–1000 °С викликає термічну дисоціацію незначної кількості мінеральних речовин (2,87% сух. мат.). Вміст золи та нижча теплота згорання в поживних рештках кукурудзи визначена на рівні 4,11% сух. мат. та 18 МДж/кг відповідно.

Термічне розкладання стебел соняшнику за характером подібне до розкладання стебел кукурудзи. Це є цілком закономірним, оскільки рештки соняшника, як і кукурудзи – рослинний матеріал, де основними компонентами є геміцелюлоза, целюлоза та лігнін. Дегідратація стебел соняшнику спостерігається в інтервалі 22–170 °С, з максимумом швидкості зневоднення при 80 °С. Розпадання органічних речовин відбувається у декілька стадій з різною інтенсивністю. Максимальна середня швидкість розкладання реєструється на першій стадії (170–348 °С), деструктивних змін зазнає 65,96% органічних речовин. Пік швидкості розкладання (273 °С) спостерігається на низькотемпературній стадії. Тепловиділення досягає максимуму при 292 °С і через завершення розкладання термонестійких компонентів (геміцелюлоз) спадає. На другій стадії (348–513 °С) розкладання целюлозо-лігнінової фракції призводить до зростання тепловиділення і після досягнення максимуму (438 °С) починає спадати, що свідчить про закінчення розкладання основної маси органічних речовин. На третій стадії за 513–594 °С завершується розкладання органічних речовин (1,28 %). Мінеральні речовини (3,84% сух. мат.) термічно дисоціюють в інтервалі 594–1000 °С. Вміст золи в зразку стебла соняшника складає 10,24% сух. мат. Визначена нижча теплота згорання решток соняшнику становить 16 МДж/кг.

На основі проведених досліджень запропоновано технологію одержання твердого композитного палива з відходів сільськогосподарської діяльності рослинного походження та твердих побутових відходів, яке може спалюватися в топках когенераційних та теплогенеруючих установок. Створення палива на основі відходів, зокрема твердих побутових та сільськогосподарських, є перспективним напрямком виробництва альтернативного палива, що забезпечить ефективну утилізацію відходів із різних галузей та сприятиме зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище. З метою пошуку раціонального складу палива було досліджено ряд експериментальних палив. Варіювання складом дозволило оцінити потенціал щодо виробництва композитного палива високої якості.

Технологія одержання твердого композитного палива включає сортування твердих побутових відходів з вилученням негорючих фракцій та їх попереднє подрібнення до часток розміром ~100 мм. Окремо подрібнюють до ~100 мм рештки кукурудзи та/або соняшника. Подрібнені горючі тверді побутові відходи (60 – 80%) та поживні рештки кукурудзи та/або соняшника (20 – 40%) змішують та підсушують в барабанній сушарці, після чого проводять повторне подрібнення до ~50 мм [5]. Компоненти палива варіюються у заданому діапазоні відповідно до вимог кінцевого споживача.

ПОСИЛАННЯ

1. AgroBioHeat. Енергія з решток кукурудзи : посібник / Г. Гелетука та ін. [Б. м. : б. в.], 2022. 48 с. URL: https://uabio.org/wp-content/uploads/2022/04/Maize-residues-to-Energy_ukr-web.pdf (дата звернення: 04.02.2026).
2. Перспективи енергетичного використання побічної продукції від вирощування соняшнику : аналітична записка UABIO. 2020. № 25. 35 с. URL: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/10/uabio-position-paper-25-ua.pdf> (дата звернення: 04.02.2026).
3. Корінчевська Т. В., Михайлик В. А. Термічна деструкція гранульованого палива з міскантуса. Scientific Works. 2020. Т. 84, № 1. С. 10–15. URL: <https://doi.org/10.15673/swonaft.v84i1.1862>.
4. Термічний аналіз гранульованого біопалива торрефікованого у атмосфері власного газоподібного середовища / В. А. Михайлик та ін. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т. 41, №4. С. 64–71.
5. Спосіб одержання твердого композитного палива : пат. 160084 Україна : C10L 5/40, C10L 5/44. № u202403505 ; заявл. 08.07.2024 ; опубл. 06.08.2025, Бюл. № 32. 4 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ КІНЕТИКИ СУШІННЯ ОСАДІВ СТІЧНИХ ВОД ЗВАЛИЩ ТВЕРДИХ ПОБУТОВИХ ВІДХОДІВ

Ж. О. Петрова¹, А. В. Бадеха², Ю. П. Новікова³

Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Марії Капніст, 2а, м. Київ, 03057, Україна,
тел.: (099) 139-71-21, e-mail: yulianovikova3@gmail.com

У роботі представлені результати дослідження кінетики сушіння осадів стічних вод твердих побутових відходів.

Ключові слова: сушіння, осад, стічні води твердих побутових відходів.

STUDY OF THE KINETICS OF DRYING SEDIMENTS FROM WASTEWATER LANDFILLS OF SOLID HOUSEHOLD WASTE

Zh. O. Petrova¹, A. V. Badekha², Yu. P. Novikova³

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: yulianovikova3@gmail.com

The paper presents the results of a study on the kinetics of drying wastewater sludge from solid domestic waste.

Key words: drying, sediment, wastewater from solid domestic waste.

ORCID: ¹0000-0001-7385-8495; ²0009-0003-3903-3766; ³0000-0002-6705-1000.

Очищення фільтратів звалищ побутових відходів дозволяє отримати технічну воду, для подальшої обробки та осад. В подальшому осад можливо переобляти у паливо, але у зв'язку з високою вологістю його доцільно спочатку сушити. Дослідження кінетики сушіння проводили на експериментальному конвективному стенді з автоматичним збором інформації, який розроблено в Інституті технічної теплофізики НАН України. Проведено серію дослідів по впливу температури теплоносія на тривалість сушіння композитної сировини на основі мулових відкладень, твердих побутових відходів, торфу та біомаси [1].

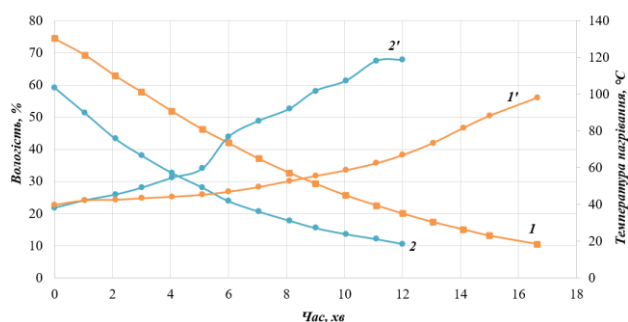


Рис. 1. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння та температуру матеріалу з різною початковою вологістю осадів ТПВ, при $T = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 1,5$ м/с, $\delta = 10$ мм, $d = 12$ г/кг с. п.: 1,1' - 75%; 2,2' - 60%

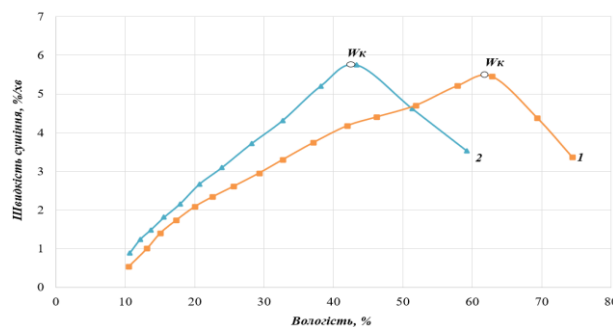


Рис. 2. Вплив температури теплоносія на швидкість сушіння осадів ТПВ з різною початковою вологістю, при $T = 120^{\circ}\text{C}$, $V = 1,5$ м/с, $\delta = 10$ мм, $d = 12$ г/кг с. п.: 1 - 75%; 2 - 60%.

Дослідження сушіння осадів стічних вод проводили на експериментальному конвективному сушильному стенді з початковою вологістю 60 та 75%. На рис. 1 представлено кінетика сушіння осадів стічних вод із визначенням тривалості процесу сушіння від зміни вологості матеріалу.

Як видно з рисунку 1 тривалість сушіння осадів стічних вод з початковою вологістю $W=75\%$ становить близько 17 хв та прогрівається до температури 98°C . При зниженні початкової вологості осадів стічних вод до $W=60\%$ знижує тривалість сушіння до 12 хв та з кінцевою температурою прогрівання матеріалу до 118°C , що вище на 20°C за попередній зразок.

На рис. 2 представлені криві швидкості сушіння осадів стічних вод при різних початковій вологості.

На кривих швидкості сушіння спостерігається стадія нагрівання матеріалу до критичної вологості матеріалу із підвищенням швидкості сушіння, а після переходу до стадії падаючої швидкості сушіння із зниженням вологості матеріалу відбувається відповідне зниження швидкості сушіння. Максимальна швидкість сушіння в критичній точці W_k вища в зразку 2 з початковою вологістю 60% і становить 5,8%/хв, що вище на 0,3%/хв до значення 5,5%/хв.

Для подальшого сушіння та створення композитної сировини на основі осадів стічних вод твердих побутових відходів рекомендовано зниження температури теплоносія від 120 до 100°C для того, щоб понизити втрату летких компонентів при сушінні і таким чином збільшити теплоту згоряння отриманого композитного палива.

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>

ВИРОБНИЦТВО МЕТАНОЛУ ШЛЯХОМ ГАЗИФІКАЦІЇ ВУГЛЕЦЕВМІСНОЇ СИРОВИНИ РІЗНОГО ПОХОДЖЕННЯ

К. Є. П'яних¹, Д. М. Невчас²

Інститут газу Національної академії наук України,
вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, e-mail: pyanykh67@gmail.com

А. І. Трипольський³, П. Є. Стрижак⁴

Інститут фізичної хімії ім. Л. В. Писаржевського Національної академії наук України
проспект Науки, буд. 31, Київ, 03028, Україна, e-mail: pyanykh67@gmail.com

Розглянуто можливість виробництва метанолу з вітчизняної вуглецевмісної сировини шляхом її газифікації з подальшим каталітичним синтезом. Проаналізовано потенціал використання біомаси, відходів, торфу та вугілля як джерела синтез-газу. Наведено результати математичного моделювання газифікації біомаси та показано, що склад отриманого газу потребує коригування для використання у процесі синтезу метанолу. Запропоновано використання газогенератора типу ГПД, який дозволяє змінювати співвідношення Н/С за рахунок часткового вилучення вуглецю у вигляді коксового залишку. Описано лабораторну установку для дослідження процесів газифікації та синтезу метанолу.

Ключові слова: біомаса, газифікація, газогенератор, метанол, синтез-газ, каталітичний синтез.

METHANOL PRODUCTION BY GASIFICATION OF CARBON-CONTAINING RAW MATERIALS OF DIFFERENT ORIGIN

K.Ye. Pyanykh¹, D.M. Nevchas²

Gas Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine
39 Dehtyariivska St., 03113 Kyiv, Ukraine, e-mail: pyanykh67@gmail.com

A.I. Tripolskyi³, P.Ye. Stryzhak⁴

L.V. Pisarzhevsky Institute of Physical Chemistry of the National Academy of Sciences of Ukraine
31 Nauky Ave., Kyiv, 03028, Ukraine, e-mail: pyanykh67@gmail.com

The possibility of methanol production from domestic carbon-containing raw materials via gasification followed by catalytic synthesis is considered. The potential of using biomass, waste, peat, and coal as sources of synthesis gas is analyzed. The results of mathematical modeling of biomass gasification are presented, showing that the composition of the produced gas requires adjustment for its effective use in methanol synthesis. The use of a GPD-type gas generator is proposed, which allows modification of the H/C ratio due to partial removal of carbon in the form of a coke residue. A laboratory installation designed for studying gasification processes and methanol synthesis is described.

Keywords: biomass, gasification, gas generator, methanol, synthesis gas, catalytic synthesis.

ORCID: ¹0000-0003-0158-4696, ²0009-0003-5092-3030, ³0000-0003-1682-0241, ⁴0000-0003-0280-8719.

Метанол є одним з базових продуктів сучасної хімічної промисловості. Він широко використовується як сировина для виробництва формальдегіду, оцтової кислоти, синтетичних палив та інших хімічних продуктів. Метанол також застосовується безпосередньо у технологічних процесах, зокрема для запобігання утворенню гідратів та обмерзанню свердловин газових родовищ і трубопроводів. На сьогодні цей ресурс в Україні не виробляється. Тому створення технологій виробництва метанолу з доступної вітчизняної сировини є важливим завданням підвищення енергетичної та технологічної незалежності держави.

Одним із перспективних шляхів виробництва метанолу, в тому числі «зеленого» метанолу, є його каталітичний синтез з газоподібних продуктів газифікації твердих вуглецевмісних матеріалів. Потенційною сировиною для такого процесу можуть бути біомаса сільськогосподарського та лісового походження, деякі види побутових і промислових

відходів, торф, а також буре і кам'яне вугілля. Значний ресурс біомаси та відходів в Україні створює передумови для використання цих матеріалів у технологіях термохімічної переробки.

Газифікація вуглецевмісної сировини дозволяє отримувати синтез-газ, основними компонентами якого є водень та оксид вуглецю. Результати математичного моделювання процесу паро-кисневої газифікації біомаси показують, що у продуктах газифікації можливе досягнення концентрації водню близько 50 %, а монооксиду вуглецю – близько 40 %. Незважаючи на достатньо високий вміст цих компонентів, співвідношення H_2/CO_x у такому газі не відповідає оптимальному складу для синтезу метанолу.

Науковцями Інституту фізичної хімії ім. Л.В.Писаржевського НАНУ запропоновано використання процесу синтезу за умов: температура: 250–300 °С, тиск: 80–100 атм (8–10 МПа) в присутності мідьвмісного каталізатора. Цей процес є екзотермічним, тому реальний склад продуктів визначається одночасною дією кількох хімічних реакцій [1, 2]:

1) синтез метанолу з оксиду вуглецю	$CO + 2H_2 \leftrightarrow CH_3OH$	$\Delta H = - 90,7 \text{ кДж/моль}$
2) синтез метанолу з діоксиду вуглецю	$CO_2 + 3H_2 \leftrightarrow CH_3OH + H_2O$	$\Delta H = - 49,5 \text{ кДж/моль}$
3) парова конверсія	$CO_2 + H_2 \leftrightarrow CO + H_2O$	$\Delta H = + 41,2 \text{ кДж/моль}$

Оцінка придатності синтез-газу для синтезу метанолу проводиться за функціоналом $f = (H_2 - CO_2)/(CO + CO_2)$. Оптимальне значення цього параметра для промислового синтезу метанолу є близьким до 2,0–2,05 [3]. Для газів, отриманих при газифікації біомаси, характерним значенням f є рівень 0,5–0,6. Очевидно, що для синтезу метанолу потрібно коригування складу цього синтез-газу шляхом додавання водню або вилучення CO_2 , що підвищує вартість сировини і знижує економічні перспективи впровадження технології.

Одним із шляхів покращення складу синтез-газу є застосування газогенераторів типу ГПД, розроблених Інститутом газу НАН України. Особливістю технологічного процесу, який реалізовано в цих агрегатах є можливість часткового виведення вуглецю з реакції газифікації з утворенням коксового залишку. В результаті відбувається зміна співвідношення Н/С у частині палива, яка переходить у газову фазу, що дозволяє наблизити склад синтез-газу до оптимального для синтезу метанолу. Газифікація з використанням цього обладнання лузги соняшнику, умовна формула якої на сухий стан (daf), виглядає як $CH_{1,6}O_{0,5}N_{0,002}S_{0,001}$, призводить до перетворення в газоподібні продукти частини органіки, співвідношення Н/С для якої становить 1,97/1 з виведенням у вигляді коксо-зольного залишку частини вуглецю, в кількості близько 10% від ваги первинної сировини. Для різних вихідних матеріалів маса виведеного з реакції вуглецю варіюється, досягаючи 50% від маси первинного матеріалу для гуми відпрацьованих автомобільних шин, що призводить в цьому випадку до зміни Н/С з 1,45 до 3,2.

Для експериментального дослідження процесів газифікації та синтезу метанолу розроблено лабораторну установку, яка реалізує технологічний ланцюг «газифікація – підготовка синтез-газу – каталітичний синтез». Установка включає:

- ділянку газифікації в складі: газогенератор типу ГПД, систему подачі паро-кисневого дуття, теплообмінник і систему очищення газу, водяний затвор, компресор;
- ділянку підготовки газу, яка складається з газгольдера, вузла коригування складу синтез-газу та підтримання заданого первинного тиску;
- ділянку каталітичного синтезу в складі: компресора високого тиску, проміжних балонів стабілізації витрати синтез-газу, системи рециркуляції робочого потоку, реактора, системи підтримання заданої температури процесу та рідких продуктів синтезу, а також сепаратор для відокремлення метанолу від газоподібних продуктів синтезу;

Вимірювальне обладнання забезпечує визначення витрат потоків і їх тиску, а також фіксацію рівня температур в газогенераторі та реакторі синтезу метанолу. Створена установка дозволяє досліджувати можливість виробництва метанолу з різних видів вуглецевмісної сировини та оптимізувати параметри газифікації і підготовки синтез-газу. Отримані результати свідчать про перспективність використання технології газифікації для створення в Україні виробництва метанолу на основі місцевих ресурсів.

ПОСИЛАННЯ:

1. Martin V. Twigg. Catalyst Handbook. – 2nd ed. – / New York : Routledge, 1989. 608 p. <https://doi.org/10.1201/9781315138862>
2. Outi Mäyrä and Kauko Leiviskä. Modelling in methanol synthesis. / University of Oulu Control Engineering Laboratory Report A No 37, December 2008. ISBN 978-951-42-9014-5
3. Graaf G. H., Stamhuis E. J., Beenackers A. A. C. M. Kinetics of low-pressure methanol synthesis // Chemical Engineering Science. – 1988. – Vol. 43. – P. 3185–3195.

УДК 662.6:504.06

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ БІОМАСИ ОБЛІПИХИ КРУШИНОВИДНОЇ, ВИРОЩЕНОЇ НА ТЕХНОГЕННО-ПОРУШЕНИХ ҐРУНТАХ

Л. З. Шевчик-Костюк¹, О. І. Романюк², І. В. Ощеповський³

^{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. Радзівовського 152, 31–342 Краків, Польща

тел.: (096) 241-79-03, e-mail: lesyashevchik@gmail.com

У роботі наведено результати дослідження енергетичного потенціалу біомаси фіторемедіанта обліпихи крушиновидної, вирощеної на техногенно порушених нафтозабруднених землях, для виробництва твердого біопалива.

Ключові слова: біомаса, обліпиха крушиновидна, тверде біопаливо, біоенергетика, енергетичні культури, техногенно-порушені землі.

ENERGETIC POTENTIAL OF BIOMASS OF HYPPOPHAE RHAMNOIDES PLANTS, GROWN ON TECHNOLOGICALLY DAMAGED SOILS

L. Z. Shevchyk-Kostiuk¹, O. I. Romaniuk², I. V. Oshchapovsky³

^{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,

³Henryk 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 energetic potential of Hippophae rhamnoides plants, grown on technologically damaged oil-polluted soils, for the production of solid biofuels.

Key words: biomass, Hippophae rhamnoides, solid biofuel, bioenergetics, energy crops, technologically damaged soil.

ORCID: ¹0000-0002-6394-8742; ²0000-0002-6249-2683, ³0000-0001-5845-5831.

Біоенергетика займає провідне місце серед відновлюваних джерел енергії і деревна біомаса є домінуючим джерелом для виробництва теплової енергії. Однак потенціал деревної біомаси в Україні ще в 2020 році було використано більш ніж на 90 % [1], а тому актуальним є цілеспрямоване отримання біомаси для виробництва біоенергії. Вирощування енергетичних рослин на малопродуктивних, деградованих або забруднених землях – перспективний напрям, що дозволяє використовувати незадіяні землі, відновлювати ґрунти (фіторемедіація) та отримувати біомасу для енергетики.

В умовах збільшення площ деградованих і забруднених земель, актуалізації проблем енергетичної безпеки, декарбонізації, Україна потребує інтегрованих рішень, що поєднують екологічне відновлення території із формуванням внутрішніх джерел відновлюваної енергії.

У багатьох країнах активно досліджується потенціал енергетичних культур для поєднання виробництва біопалива з фіторемедіацією забруднених земель. Однак, не всі відомі енергетичні культури можуть рости в умовах забруднення та продукувати високі врожаї якісної біомаси. Доведено, що обліпиха крушиновидна здатна рости на техногенних відвальних нафтозабруднених ґрунтах озокеритовидобутку, відновлювати їх та інтенсивно накопичувати біомасу [2]. Вона є багаторічною, швидкозростаючою деревною культурою і виконує фітомеліоративну, протиерозійну та ґрунтопокращувальну ролі. 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 – оцінити енергетичний потенціал біомаси обліпихи крушиновидної, вирощеної на техногенно порушених нафтозабруднених землях, для виробництва твердого біопалива.

Досліджено надземну біомасу обліпихи крушиновидної (*Hippophae rhamnoides* L.), вирощену на техногенних, 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 фіторе mediaційних ділянок на четвертий рік росту і визначено основні паливні характеристики. Для розрахунку очікуваної продуктивності надземної біомаси обліпихи на четвертий та шостий рік зростання опрацьовані дані ростових показників 28 модельних дерев з трьох фіторекультивуваних ділянок та побудовано варіаційні ряди з визначенням рівня зростання. Оцінку якості біомаси здійснено відповідно до вимог міжнародної схеми сертифікації ENPlus, яка гарантує високу якість деревного біопалива, його відповідність вимогам енергоефективності та екологічності [5].

Встановлено, що паливні характеристики обліпихи відповідають вимогам міжнародної схеми сертифікації ENPlus. Вміст важких металів у надземній біомасі чотирирічних рослин не перевищує встановлених значень для твердого біопалива відповідно до норм ENPlus (Табл. 1).

Таблиця 1. Паливні характеристики біомаси та вміст важких металів у біомасі обліпихи крушиновидної, вирощеної на техногенно-порушених нафтозабруднених ґрунтах

Показники	Вологість при збиранні, %	Теплота згоряння, МДж/кг	Зольність, %	Cu	Zn	Ni	Pb	Cd
Обліпиха	40,68 ±1,19	20,60±0,83	1,40±0,25	9,67±0,02	29,64±0,08	1,50±0,04	1,25±0,04	0,41±0,03
ENPlus	—	16-19	≤0,7-3,0	<10	<100	<10	<10	<0,5

Чотирирічна енергетично-рекультивувальна плантація обліпихи на техногенно порушених нафтозабруднених ґрунтах здатна давати 20–25 т/га деревної біомаси, шестирічна – 35–40 т/га, що в еквіваленті потенційної енергії становить відповідно 412–515 ГДж/га та 721–824 ГДж/га і є достатньо високим показником для деревних енергетичних рослин, особливо враховуючи те, що обліпиха одночасно виконує фіторе mediaційну роль.

Отримані дані вказують на те, що обліпиха крушиновидна характеризується високим енергетичним потенціалом і може бути потенційною енергетичною культурою, яка здатна зростати і накопичувати якісну біомасу в складних умовах техногенно-порушених ґрунтів, забруднених важкими металами та нафтовими вуглеводнями. Тверде біопаливо з біомаси обліпихи може використовуватися в індивідуальному секторі (побутові котли і печі), а також у комунальних, промислових котельнях та забезпечувати територіальні громади, населені пункти тепловою енергією для опалення та гарячого водопостачання.

Закладання рекультивувально-енергетичних плантацій обліпихи дозволить ефективно використовувати техногенно-порушені землі, в тому числі, забруднені внаслідок воєнних дій, що покращить екологічний стан в регіонах, зменшить проблему забезпечення енергоресурсами, сприятиме реалізації Національного плану дій з відновлюваної енергетики та клімату.

ПОСИЛАННЯ

1. Біоенергетична асоціація України [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.uabio.org/>
2. Шевчик Л. З., Романюк О. І. Використання обліпихи крушиновидної для фіторе mediaції 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., Jurkane 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. Гелетука Г. Ред. Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні. Практичний посібник. К.: Поліграф плюс, 2015. 72 с.

УДК 620.93; 663.53

ВПЛИВ ПАРАМЕТРІВ ПОПЕРЕДНЬОЇ ЛУЖНОЇ ОБРОБКИ НА ВИДІЛЕННЯ ЛІГНІНУ З БІОМАСИ В КАВІТАЦІЙНОМУ РЕАКТОРІ РОТОРНОГО ТИПУ

В. В. Сидоренко, Р. Є. Базєєв

*Інститут технічної теплофізики НАН України,
вул. Булаховського, 2, м. Київ, 03164, Україна*

Розглянуто вплив обробки лужних розчинів соломи пшеничної в кавітаційному реакторі роторного типу на процес видалення лігніну протягом термо-механо-хімічної підготовки сировини до гідролізу.

Ключові слова: біоетанол, лужна попередня підготовка, екстракція лігніну, кавітація, кавітаційний реактор роторного типу.

EFFECT OF PARAMETERS OF ALKALINE PRETREATMENT ON EXTRACTION OF LIGNIN FROM BIOMASS IN A ROTATIONAL HYDRODYNAMIC CAVITATION REACTOR

V. V. Sydorenko, R. Ye. Bazeev

Institute of Engineering Thermophysics of the NAS of Ukraine, 2 Bulahovskoho str., Kyiv, 03164, Ukraine

The effect of treating wheat straw with alkaline solutions in a Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor on the lignin removal during the thermo-mechano-chemical pretreatment of raw materials for hydrolysis was considered.

Key words: bioethanol; alkaline pretreatment; lignin extraction; cavitation; Rotational Hydrodynamic Cavitation Reactor.

¹0000-0001-7735-7719; ²0000-0002-6515-3492.

Отримання біоетанолу з лігноцелюлозної біомаси, порівняно з цукро- або крохмалевмісною сировиною, є більш витратним тому що перетворення лігноцелюлози у відновлюючі цукри є складнішим, ніж перетворення крохмалю [1, 2].

Успішна конкуренція етанолу другого покоління з етанолом першого покоління, а також з викопним паливом може бути досягнута, зокрема, завдяки впровадженню технологій та обладнання, які дозволяють підвищити ступінь перетворення сировини в етанол без істотного збільшення у собівартості, а за рахунок вилучення побічних продуктів переробки та їх подальшої переробки в цінні продукти.

Одним із етапів комплексної обробки рослинної сировини є відокремлення лігніну та геміцелюлози від лігноцелюлозного комплексу з подальшим отриманням з нього цінних хімічних продуктів чи палива. Цей етап є невід'ємною частиною попередньої підготовки сировини до гідролізу, проте є найбільш енерговитратним в процесі отримання паливного етанолу [3], що має на меті зруйнувати стійкої структури целюлозної біомаси, зробити целюлозу більш доступною для ферментів, які перетворюють вуглеводні полімери в цукри, що ферментуються. Високі енерговитрати попередньої підготовки сировини до гідролізу обумовлені тим, що цей процес відбувається за підвищених температур та тиску [4].

Останнім часом збільшилась кількість досліджень щодо використання явища гідродинамічної кавітації для попередньої обробки лігноцелюлозної сировини до гідролізу, оскільки гідродинамічна кавітація більш ефективна, ніж акустична кавітація, через її здатність окислювати органічні речовини у поєднанні з низькою вартістю експлуатації, легкою масштабованістю, високою енергоефективністю та меншим забрудненням без утворення побічних продуктів. В якості пристроїв для генерування кавітації застосовували сопло Вентурі, діафрагму, кавітаційні генератори на основі відцентрових насосів.

Ротаційні реактори, або ротаційні генератори гідродинамічної кавітації, або роторно-пульсаційні апарати (переважно дискові та циліндричні) створені на базі відцентрових насосів, у корпус яких додано модифікований ротор і статор.

У цьому типі реактора явище кавітації створюється численними блоками генерації кавітації, розташованими на роторі та статорі. Геометрична структура цих блоків є фундаментальною для створення кавітації, а також економічної ефективності. Крім того, частота вивільнення енергії значно вища порівняно з неротаційними реакторами гідродинамічної кавітації [5]. Ротаційні реактори показали чудову продуктивність у порівнянні з неротаційними реакторами в технологіях, пов'язаних з перемішуванням, гомогенізацією, диспергуванням тощо.

Принцип роботи таких пристроїв полягає в акумулюванні енергії в локально роз'єднаних дискретних точках системи з подальшою імпульсною реалізацією для досягнення необхідних фізичних ефектів, а саме: підвищення та скидання тиску, адіабатичне скипання, гідроудар, ударна хвиля, зсувні напруги, локальна турбулентність, кавітація [6].

Вигідною відмінністю таких пристроїв є комбінація гідродинамічної кавітації що створюється в зонах кавітації, розташованих в робочій зоні апарата, та високо градієнтних зсувних напружень, що виникають між ротором та статором.

Метою досліджень було визначення впливу технологічних параметрів обробки лужних розчинів соломи пшеничної в кавітаційному реакторі роторного типу на процес видалення лігніну протягом термо-механо-хімічної підготовки сировини до гідролізу.

Висновки

Встановлено, що вплив термодинамічних і гідродинамічних процесів, що відбуваються в кавітаційному реакторі роторного типу, дає змогу збільшити вихід лігніну порівняно з традиційною обробкою при тих самих технологічних параметрах лужної попередньої обробки рослинної сировини для ферментації. Порівнюючи отримані результати екстракції лігніну з аналогічними результатами для інших видів обробки, наведених вище, можна визначити певні переваги, а саме - процес екстракції відбувається при температурі нижче 100°C і атмосферному тиску.

ПОСИЛАННЯ

1. Cheng, M.H., Huang, H., Dien, B.S. & Singh, V. (2019). The costs of sugar production from different feedstocks and processing technologies. *Biofuels, Bioprod. Biorefin.*, 13, 723-739. <https://doi.org/10.1002/bbb.1976>
2. Robak, K.M., Balcerek, M. (2018). Review of Second Generation Bioethanol Production from Residual Biomass. *Food Technol. Biotechnol.*, 56(2), 174-187. <https://doi.org/10.17113/ftb.56.02.18.5428>
3. Beig, B., Riaz, M., Raza Naqvi, S., Hassan, M., Zheng, Z., Karimi, K., Pugazhendhi, A., Atabani, A.E., Thuy Lan Chi, N. (2021). Current challenges and innovative developments in pretreatment of lignocellulosic residues for biofuel production: A review. *Fuel*, 287, 119670. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119670>
4. Aftab, M.N., Iqbal, I., Riaz, F., Karadag, A. & Tabatabaei, M. (2019). Different Pretreatment Methods of Lignocellulosic Biomass for Use in Biofuel Production, In: A.E. Abomohra (Ed.), *Biomass for Bioenergy - Recent Trends and Future Challenges*, IntechOpen: London, <https://doi.org/10.5772/intechopen.84995>
5. Sun, X., Liu, J., Ji, L., Wang, G., Zhao, S., Yoon, J.Y., Chen, S. (2020). A review on hydrodynamic cavitation disinfection: the current state of knowledge. *Sci. Total Environ.*, 737, 139606. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139606>
6. Dolinsky, A. A. (ed). (2015). *Micro- and nano-level processes in DPIE technologies*. Akadempriodica, Kyiv

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ПРОДУКТІВ ГАЗИФІКАЦІЇ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ТА ПРОМИСЛОВИХ ВІДХОДІВ З ПРОГНОЗНОЮ ОЦІНКОЮ ВИКИДІВ CO₂

Сорока Б. С., Згурський В. О., П'яних К. Є., Кудрявцев В. С.

*Інститут газу НАН України, Київ
м. Київ, 03113, Україна,
вул. Дегтярівська, 39
тел.: +380 44 455 5998, e-mail: boris.soroka@gmail.com*

В роботі визначені склади, теплофізичні характеристики продуктів газифікації сільськогосподарських відходів п'яти складів та подрібненої гуми з розрахунками утворення CO₂ як основного парникового газу.

Ключові слова: *альтернативні і відновлювальні палива, газифікація відходи, діоксид вуглецю CO₂, теплофізичні властивості, парникові гази, пелети деревини, природний газ, сільськогосподарська продукція.*

THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF GASIFICATION PRODUCTS OF AGRICULTURAL AND INDUSTRIAL WASTES WITH A PREDICTIVE ESTIMATION OF CO₂ EMISSIONS

B. Soroka, V. Zgurskyi, K. Pyanykh, V. Kudryavtsev

*The Gas Institute, the NAS of Ukraine,
39, Dehtyaryivska St., Kyiv, 03113, Ukraine,
phone: +380 44 455 5998, e-mail: boris.soroka@gmail.com*

The work determines the compositions and thermophysical characteristics of the gasification products of agricultural waste of five compositions and shredded rubber with calculations of the formation of CO₂ as the main greenhouse gas.

Key words: *agricultural products, alternative and renewable fuels, carbon dioxide CO₂, greenhouse gases, natural gas, thermophysical properties, waste's gasification, wood pellets.*

B. Soroka [ORCID: 0000-0001-9174-0992](https://orcid.org/0000-0001-9174-0992);

V. Zgurskyi [ORCID: 0000-0003-1348-8212](https://orcid.org/0000-0003-1348-8212);

K. Pyanykh [ORCID: 0000-0003-0158-4696](https://orcid.org/0000-0003-0158-4696);

V. Kudryavtsev [ORCID: 0000-0002-5323-4949](https://orcid.org/0000-0002-5323-4949).

Поточна оцінка потреб в паливі вказує на неможливість своєчасного виконання планів, намічених згаданою програмою Паризької конвенції (2015) та на затримку намічених програмою термінів та обсягів впровадження промислових теплових систем, опалюваних з використанням водню. До 2030 р. передбачено електролізне виробництво "зеленого" водню в ЄС обсягом 10 млн. т [1]. При цьому до 2030 р. розраховують на впровадження європейську енергосистему безвуглецевих (CO₂-free) технологій з урахуванням геополітичних обставин [1].

Більшість установок планується лише на рівні пілотних проектів. Впровадження безвуглецевих технологій, включаючи виробництво "зеленого" водню, передбачається з використанням відновлюваних енергійних джерел [1].

● Тенденція до декарбонізації довкілля зумовила, в т.ч., зміну технологій термічної обробки матеріалів та виробів в промисловості, зокрема замість газових нагрівальних печей планується використання електричних печей опору та індукційних, в той же час в багатьох випадках газові печі мають більш високий ККД, ніж електричні [2].

Трендом останнього часу є використання систем гібридного нагрівання, яку включають базове нагрівання (basic heating) систем газового нагрівання і систем кінцевого нагрівання (final heating in inline or offline combination) [2]. Використовуються комбінації електричного нагрівання в системах електричного опору як базовій стадії, та індукційних печей – на кінцевій стадії (система ЕННКО). ККД на базовій стадії (електричний опір) складає до 87%; індукційна піч має ККД 64% [2].

• Впровадження нових технологій супроводжується зміною конструкцій печей та пальників. Одночасно із зміною трендів щодо перспективних палив формується найбільш очікуваний на значний подальший період спосіб опалювання промислових печей. Цей безальтернативний напрям майбутнього (на погляд провідної в Німеччині та ЄС компанії **Aichelin Group (GmbH)** – термічні та термохімічні технології та виробництво)) – використання електричної енергії в печах як основної [3]. Як вважає компанія, питанням є тільки термін, коли, в якій формі та наскільки швидко природний газ поступить свої позиції електричній енергії [3].

- **Теплофізичні властивості палив та продуктів згоряння** є визначальними характеристиками при виборі палив для окремих термічних процесів в промислових печах, а також при реалізації технологічних процесів при спалюванні систем різного призначення, потужності та робочих температур. Окреме місце серед термічних та термохімічних технологій в умовах використання гібридних ("hybrid heating") джерел енергопостачання та сталого розвитку (sustainability) [4] займають відновлювані палива (renewable), в т.ч. одержані з біосировини, в т.ч. біовідходів та залишків сільськогосподарської продукції. В певних випадках мова йде про промислові відходи із вмістом вуглецевих та водневих з'єднань.

В табл. 1 наведені покомпонентні склади продуктів газифікації сільськогосподарської продукції: пелет з деревини (ПД), тріски деревини (ТД), пелет сояшника (ПЛС), пелет з міскантуса (ПМ), шкарлупи грецького горіху (ШГГ), а також з гуми подрібненої.

- **Теплофізичні властивості альтернативних газових палив** (табл. 2) розглядаються на прикладі газових палив – продуктів газифікації сільськогосподарських відходів, а також промислової покиді – подрібненої гуми (табл. 1). Відмінною рисою зазначених палив є великий вміст нейтрального N_2 – до 55% (об.) що викликано технологією одержання палив та складом окислювача. Як наслідок, газові палива відповідного походження відрізняються незначною теплотою згоряння.
- До складу теплофізичних характеристик палив як джерела теплової енергії відносяться наступні індикатори: теоретична (адіабатна) температура горіння, повна (хімічна) ентальпія $I_f(T)$ (процес горіння в теплових агрегатах відбувається при постійному тиску $p = const$), надлишкові повні ентальпії продуктів згоряння $\Delta I_{CP}(T)$ для одиниці маси (1 кг) або об'єму (1 nm^3); теплоти згоряння: вища, нижча, масова, об'ємна; молекулярна маса палива; стехіометричні числа для палива по кисню та атмосферному повітрю. Як похідні від теплот згоряння визначаються відповідні числа Воббе. Завдяки певним процедурам перерахунку вдається від теплофізичних характеристик палив перейти до парникових та впливаючих на глобальний клімат характеристик викидів в процесах спалювання – продуктів згоряння – питомих викидів CO_2 на одиницю (1 МДж) теплоти згоряння палива.
- Основним індикатором карбонізації довкілля слугує діоксид вуглецю CO_2 , прогнозна кількість якого в продуктах згоряння визначається за складом палива через стехіометричні розрахунки покомпонентного складу палива:

$$[CO_2]_{\Sigma, CP} = [CO_2]_f + [CO]_f + [CH_4]_f + \sum n[C_nH_m]_f \quad (1)$$

де індекси "CP" та "f" відповідають складовим продуктам згоряння та палива (суміші) – відповідно.

Рівняння (1) складено як баланс загального числа молів CO_2 в продуктах згоряння: число молів CO_2 як компоненту продуктів згоряння – зліва, справа – кількість молів C-містких компонентів в вихідній паливній суміші.

Представлені палива – продукти газифікації – мають подібну між собою густину, оскільки від середнього для них значення молекулярні маси відрізняються в межах $\pm 5\%$, в той час як їхній покомпонентний склад може бути суттєво відмінним між окремими паливами. Це, зокрема, відноситься до початкового значення CO_2 . Що стосується кінцевих значень питомих викидів CO_2 на 1 МДж теплоти згоряння продуктів газифікації як палив, то для окремих з вивчених палив – продуктів газифікації питома маса викидів CO_2 приблизно вдвічі перевищує викиди CO_2 при спалюванні CH_4 . Для продуктів газифікації гуми відмінність питомих викидів CO_2 від таких для природного газу дещо менша: відповідний показник перевищує такий для CH_4 на 60%.

Результати розрахунків щодо утворення CO_2 як парникового газу (основного карбонізатора) наведені в табл. 3.

Базові теплофізичні характеристики та показники утворення CO_2 при спалюванні CH_4 а також температури горіння метано-водневих сумішей надані відповідно в таблицях 4 та 5. На рис. 1 та 2 представлені відповідно температури горіння та питомі викиди CO_2 для продуктів газифікації досліджені в роботі. Останній визначальний показник надано у порівнянні з таким для природного газу (метану).

Таблиця 1. Склад продуктів газифікації (по компонентний) %, об., що виробляються з вуглецевмісткий сировини в газогенераторах серії ГПД (повітряна газифікація).

Складові	Пелети з деревини	Тріска деревини	Пелети з лузги соняшнику	Пелети з міскантуса	Шкарлупа грецького горіху	Гума подрібнена
H ₂	10.15	13.35	16.86	16.37	15.6	8.57
CO	13.51	16.03	19.51	4.07	18.1	0
CH ₄	4.16	5.57	5.81	6.95	1.8	9.2
C ₂ H ₂	0.38	0.16	0	0	0.1	1.1
C ₂ H ₄	2.39	0.77	0.71	0.17	0.4	0.02
C ₂ H ₆	0.32	0.11	0.18	0.412	0.1	0.594
C ₃ H ₆	0	0	0	0	0	0
C ₃ H ₈	0.34	0.07	0.1	0.12	0	0.18
<i>i</i> -C ₄ H ₁₀	0.04	0	0	0.02	0.5	0.526
<i>n</i> -C ₄ H ₁₀	0.13	0	0	0.1	0	0.33
H ₂ S	0	0	0	0.255	0	0.35
CO ₂	11.56	12.49	9.15	16.92	8.4	10
H ₂ O	3.13	2.62	2.69	2.315	2.30	2.23
N ₂	53.89	48.83	44.99	52.30	52.70	66.90

Таблиця 2. Теплофізичні характеристики газів – продуктів газифікації.

Характеристика	Пелети з деревини	Тріска деревини	Пелети з лузги соняшнику	Пелети з міскантуса	Шкарлупа грецького горіху	Гума подрібнена
LHV, МДж/м ³	6.630	6.137	6.988	5.442	5.559	6.484
HHV, МДж/м ³	7.231	6.728	7.662	6.156	6.066	7.237
LHV, МДж/кг	5.603	5.368	6.486	4.787	4.983	5.513
HHV, МДж/кг	6.112	5.886	7.111	5.415	5.437	6.154
T _г , К	1925	1912	2001	1781	1910	1829

Таблиця 3. Характеристики CO₂ в продуктах згоряння (ПЗ) альтернативних палив.

Характеристика	Пелети з деревини	Тріска деревини	Пелети з лузги соняшнику	Пелети з міскантуса	Шкарлупа грецького горіху	Гума подрібнена
M _f , молекулярна маса палива	26.52	25.62	24.15	25.48	25.07	26.36
кг CO ₂ /кг палива	0.616	0.625	0.666	0.517	0.554	0.444
кг CO ₂ /МДж (LHV)	0.110	0.116	0.103	0.108	0.111	0.081
кг CO ₂ /МДж (HHV)	0.101	0.106	0.094	0.096	0.102	0.072
X _{CO2} , об'ємна доля (молярна) CO ₂ в ПЗ при спалюванні з повітрям	0.153	0.162	0.153	0.134	0.153	0.102
X _{CO2} , об'ємна доля (молярна) CO ₂ в ПЗ при спалюванні з киснем (O ₂)	0.307	0.317	0.318	0.254	0.288	0.203

Таблиця 4. Характеристики при спалюванні метану.

Характеристика	CH ₄
LHV, МДж/м ³	35.81
HHV, МДж/м ³	39.83
LHV, МДж/кг	50.03
HHV, МДж/кг	55.64
T _T , К	2228
M _f , кг/кмоль (паливо)	16.04
кг CO ₂ /кг палива	2.74
кг CO ₂ /МДж (LHV)	0.055
кг CO ₂ /МДж (HHV)	0.049

Таблиця 5. Теоретичні температури горіння суміші метану з воднем.

CH ₄ , % (об.)	H ₂ , % (об.)	T _T , К
100	0	2229
90	10	2233
80	20	2239
70	30	2245
60	40	2252
50	50	2262
40	60	2273
30	70	2288
20	80	2309
10	90	2338
0	100	2384

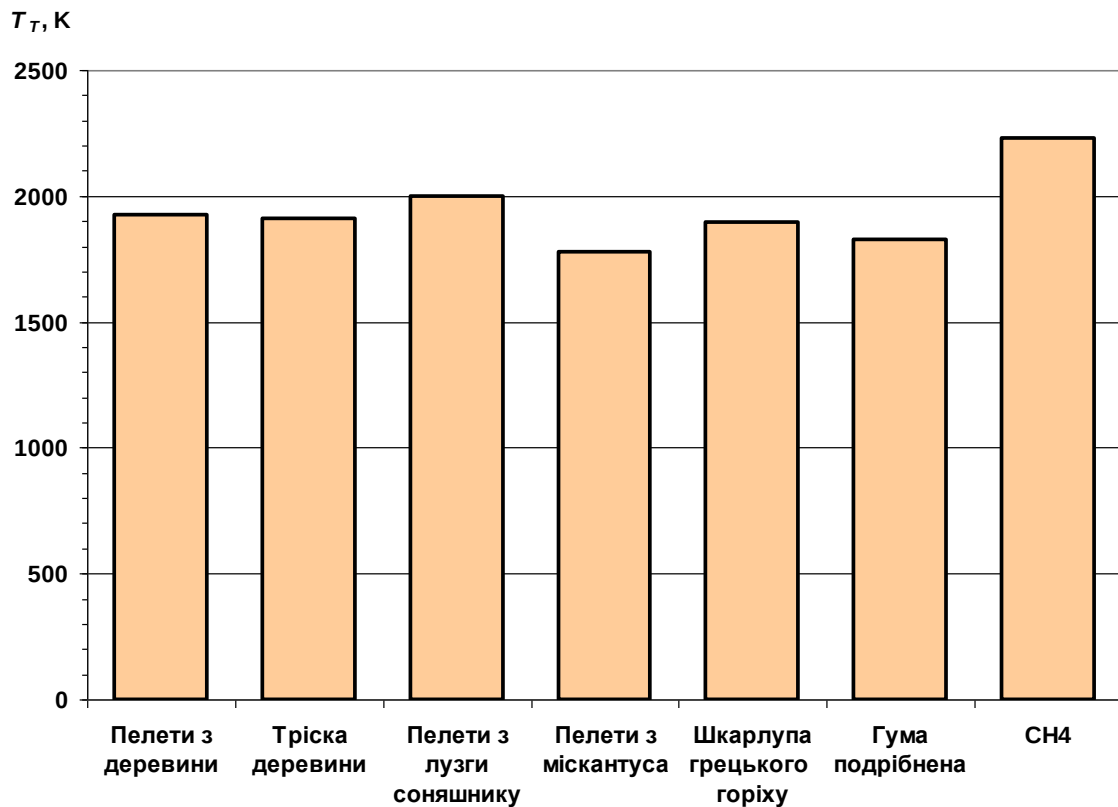


Рис. 1. Теоретичні температури горіння газів, що виробляються з вуглецевмістких сировини в газогенераторах серії ГПД (повітряна газифікація) та метану.

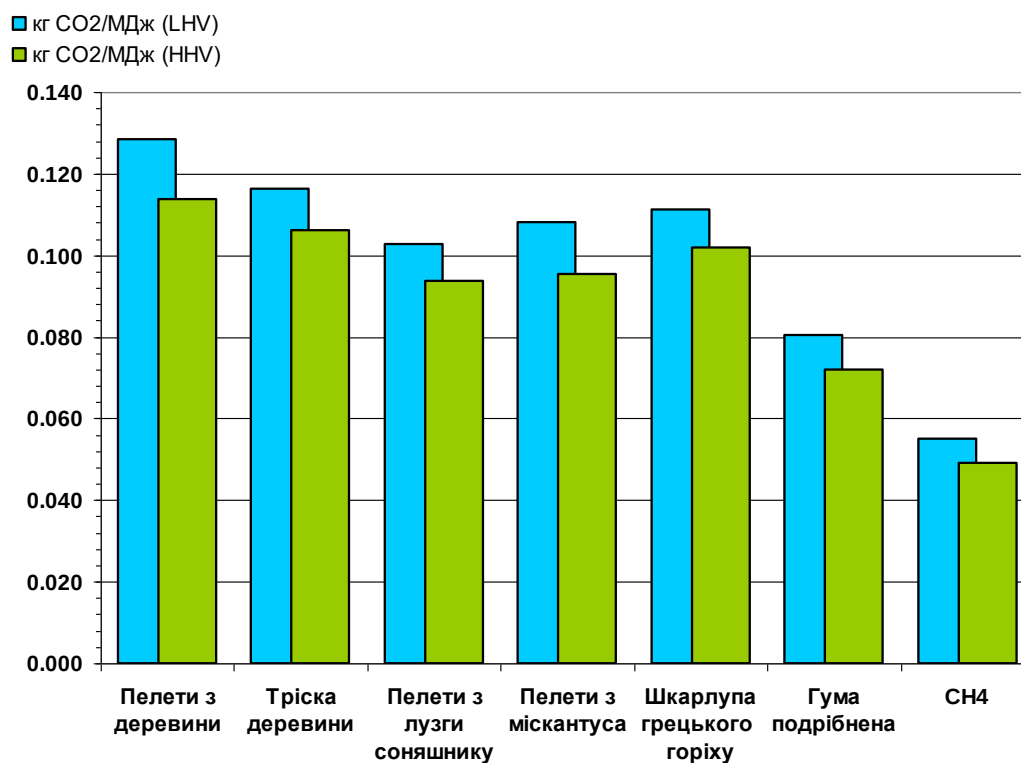


Рис. 2. Викиди CO₂, кг CO₂/МДж (LHV, HHV), при спалюванні газів, які виробляються з вуглецевмістких сировини в газогенераторах серії ГПД (повітряна газифікація) та метану.

Основні положення та висновки

З використанням авторської методики визначені основні теплофізичні властивості продуктів газифікації сільськогосподарських відходів, деревневої сировини та подрібненої гуми; включаючи теплоти згоряння, вищу та нижчу, масову та об'ємну; теоретичні (адіабатні) температури горіння. Розроблені методики розрахунку викидів CO₂ як основного парникового газу, в т.ч. величину питомих викидів CO₂ на 1 МДж теплоти згоряння кожного з палив. Встановлено, що останні величини для досліджених продуктів перевищують відповідні величини для продуктів згоряння природного газу. Тим самим ставиться під сумнів вимога до виключення органічного палива зі складу рекомендованих до використання (згідно з вимогами паризької кліматичної угоди (2015)).

ПОСИЛАННЯ

1. Gose S., Schönberger P. Hydrogen combustion: a feature-oriented technology driving industrial decarbonization // Heat Processing.– 2025, # 03. – pp. 39–43.
2. Günter J., Beer S. New Milestone for the aluminum extrusion industry – the EHNKO from extrutec // Heat Processing. – 2025, # 03. – pp. 26–29.
3. Grosspointner Ch. “Europe past wakeup from its slumber” // Heat Processing.– 2025, # 03. – pp.12–15.
4. Soroka, B., & Zgurskyi, V. (2025). Selection the fuel composition for industrial furnaces to control the climate impact. Part 1. Decarbonization of environment by natural gas admixing with hydrogen in conditions of hybrid energy supply of industry. *Energy Technologies & Resource Saving*, 83(2), 5-22. <https://doi.org/10.33070/etars.2.2025.01>

ДОСЛІДЖЕННЯ СПАЛЮВАННЯ ПЕЛЕТ З ВІДХОДІВ ХВОЙНОЇ ДЕРЕВИНИ

О. М. Дудник¹, І. С. Соколовська^{1,2}¹Інститут теплоенергетичних технологій НАН України,
вул. Андріївська, 19, м. Київ, 04070, Україна,
тел.: (044) 425-04-19, e-mail: aldudnyk2018@gmail.com²Інститут загальної енергетики НАН України,
вул. Антоновича, 172, м. Київ, 03150, Україна

Досліджено спалювання пелет на експериментальній установці з використанням технології деревного газу. Для досліджень використано методику термогравіметричного аналізу.

Ключові слова: пелети, відходи соснової деревини, спалювання

RESEARCH OF COMBUSTION OF PELLETS FROM CONIFEROUS WOOD WASTE

O. M. Dudnyk¹, I. S. Sokolovska^{1,2}¹Thermal 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.com²General Energy Institute of National Academy of Sciences of Ukraine,
172 Antonovycha str., Kyiv, Ukraine, 03150

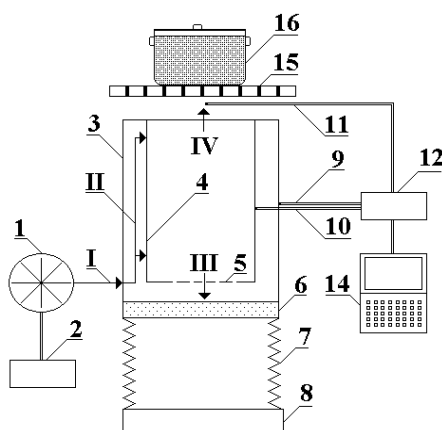
The combustion of pellets using wood gas technology was researched at the experimental installations. The thermogravimetric analysis method was used in this research.

Key words: pellets, pine wood waste, combustion.

ORCID: ¹0000-0002-9832-1536; ²0000-0003-1959-9837

Малі автономні теплотехнічні пристрої (МАТП) можна використовувати як для забезпечення локального автономного опалення, так і в польовій медицині (для приготування гарячих ліків, стерилізації, виготовлення сорбуючих речовин та антисептиків), для приготування їжі, забезпечення потреб гігієни, вироблення електроенергії тощо. Ефективність та вартість роботи МАТП залежить від вартості енергоносія, який використовується в цих пристроях, та вибору конструкції обладнання. В разі використання твердих органічних відходів реалізується принцип перетворення енергії відходів в теплову чи електричну енергію (Waste to Power) [1]. Технології деревного газу з використанням процесів піролізу, газифікації та спалювання твердої біомаси мають найкращі показники щодо спалювання твердої біомаси в портативних пересувних печах [2, 3].

Схему установки для досліджень спалювання твердої біомаси показано на рис. 1. Компактна установка призначена для досліджень кінетики процесів конверсії твердих органічних відходів, а також може використовуватися для швидкого приготування їжі в польових умовах та інших потреб [1, 3].



1- вентилятор, 2 – джерело струму вентилятора,
3, 4 – зовнішня та внутрішня стінки камери згоряння,
5 – решітка видалення золи,
6 – ізоляційні пластини, 7 – охолоджувач, 8 – ваги,
9, 10, 11 – термодари, 12 – інтерфейс, 14 – ноутбук,
15 – решітка для ємності, 16 – ємність;
I, II – холодне та гаряче повітря,
III – зола, IV – продукти згоряння

Рис. 1. Експериментальна установка для досліджень спалювання відходів твердої біомаси

Установка складається з решітки, камери згоряння, охолоджувача, вентилятора та вагів. Над камерою згоряння розташована решітка, камера згоряння встановлена на охолоджувач, охолоджувач – на ваги. Термодари розташовані:

над камерою згоряння (в потоці продуктів згоряння), на стінках зовнішнього та внутрішнього корпусів камери згоряння.

За результатами технічного аналізу вміст води, золи, летких та фіксованого вуглецю в пелетах становив, мас. %: 8,2, 0,6, 76,7, 14,5 відповідно. Вміст вуглецю, водню, кисню, азоту, води та золи в пелетах становив, мас. %: 46,3, 4,9, 38,5, 1,4, 8,2, 0,6 відповідно. Нижча теплота згоряння пелет 16,4 МДж/кг. Розмір пелет: діаметр 8 мм, довжина 8-25 мм. Насипна щільність пелет 595 кг/м³. Експерименти проводилися як з використанням (режим 1), так і без використання повітряного вентилятора (режими 2 та 3 за електричної потужності двигуна вентилятора 0,43 та 1,95 Вт відповідно).

Результати досліджень спалювання пелет з відходів хвойної деревини показано на рис. 2.

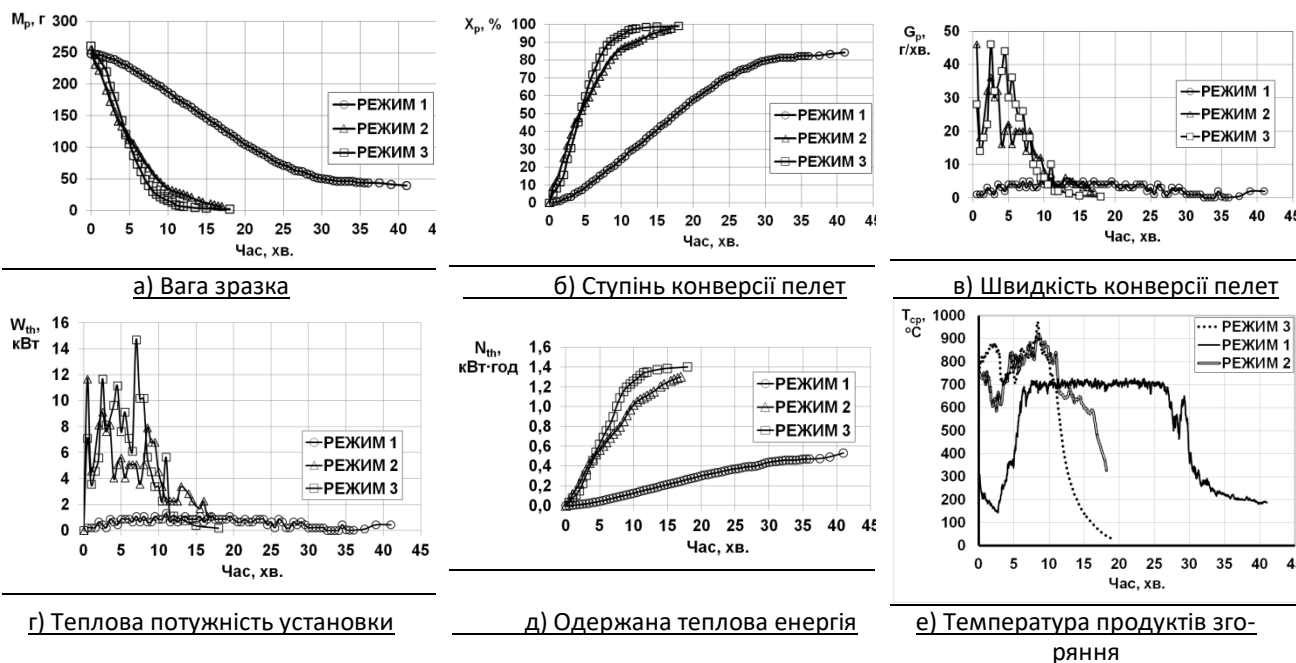


Рис. 2. Результати досліджень спалювання пелет з відходів хвойної деревини

В режимах роботи 1, 2 та 3 досягнута ступінь конверсії пелет 84,3 % за 41 хв., 97,6 % за 17 хв., 99,2 % за 17 хв. відповідно. В режимі 1 спостерігалось повільне горіння (тління) пелет – 5,1 г/хв. (209 г пелет було спалено за 41 хв.), а в режимах 2 та 3 швидке горіння пелет – 14,2 г/хв. (242 г за 17 хв.) та 14,3 г/хв. (258 г за 18 хв.) відповідно. Середня теплова потужність установки без використання вентилятора (режим 1) становила 0,77 кВт, з використанням вентилятора в режимах роботи 2 та 3 становила 4,6 та 4,7 кВт відповідно. В режимах 1, 2 та 3 всього отримано 0,53 кВт-год (1,91 МДж), 1,3 кВт-год (4,68 МДж) та 1,4 кВт-год (5,04 МДж) теплової енергії відповідно. В режимах 1, 2 та 3 максимальна температура газоподібних продуктів згоряння становила 728 °C (за температур стінок внутрішнього та зовнішнього корпусів камери згоряння 378 °C та 327 °C), 919 °C (за температур стінок зовнішнього та зовнішнього корпусів камери згоряння 483 °C та 378 °C) та 974 °C (за температур стінок внутрішнього та зовнішнього корпусів камери згоряння 510 °C та 376 °C) відповідно.

У порівнянні з використанням для спалювання відходів деревини та шкарлупи волоського горіху з насипною щільністю 300-400 кг/м³ [1, 3] завдяки використанню пелет з насипною щільністю 595 кг/м³ збільшено час роботи установки на одному завантаженні в режимах як повільного, так і швидкого горіння.

ПОСИЛАННЯ

- Дудник О. М., Соколовська І. С. Ефективність та вартість роботи автономної експериментальної установки для досліджень спалювання твердих відходів біомаси. Збірка наукових праць XXI Міжнародної науково-практичної конференції «Теплова енергетика: шляхи реновації та розвитку». 16-17 жовтня, 2025 р.- С. 104-108. URL: <https://doi.org/10.48126/conf2025#page=105> (дата звернення: 14.03.2026).
- Hayyat U. et al. Recent developments and challenges in biomass cookstove. Energy Reports. 12. 2024. P. 2193–2208. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484724005006> (дата звернення: 14.03.2026).
- Дудник О. М., Соколовська І. С. Дослідження карбонізації та спалювання твердої біомаси. Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної онлайн-конференції "Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті". 21-23 травня, 2025 р. С. 465-466. DOI: 10.36296/renewable.conf.21-2305.2025#page=465 (дата звернення: 14.03.2026).

УСТАНОВКА ПІРОЛІЗУ БІОПАЛИВА ТА ПАРОПОВІТРЯНОЇ ГАЗИФІКАЦІЇ ФІКСОВАНОГО ВУГЛЕЦЮ

Б. Б. Рохман¹, К. Є. П'яних², Г. О. Четверик³

^{1,3}Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 02094, Україна

³Тел.: (096) 912-2090, e-mail: ge_2002@yahoo.com

^{1,2}Інститут газу НАН України,

вул. Дегтярівська, 39, м. Київ, 03113, Україна

Розглянуто два способи виробництва різних за складом і теплотворною здатністю синтетичних газів: низькокалорійного – 5600–6000 кДж/нм³ та середньокалорійного – 14000 кДж/нм³ з низьким вмістом смол. Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що отриманий низькокалорійний синтетичний газ з коксозольних частинок біопалива можна використати для власних потреб установки, а середньокалорійний піролізний газ з біопалива для виробництва теплової та електричної енергії.

Ключові слова: біопаливо, піроліз, газифікація, фіксований вуглець, смола

BIOFUEL PYROLYSIS AND STEAM AIR GASIFICATION PLANT WITH FIXED CARBON

B. Rohman¹, K. Pyanykh², H. Chetveryk³

^{1,3}The Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine,
50 Metrolohychna str., Kyiv, Ukraine, 02094

³Phone: (096) 912-2090, e-mail: ge_2002@yahoo.com

^{1,2}The Gas Institute of the NAS of Ukraine,

39 Dehtiarivska str., Kyiv, Ukraine, 03113

Two methods of producing synthetic gases with different composition and calorific value were considered: low-calorie - 5600–6000 kJ/nm³ and medium-calorie – 14000 kJ/nm³ with a low tar content. The practical significance of the results obtained lies in the fact that the obtained low-calorie synthetic gas from coke oven particles of biofuel can be used for the plant's own needs, and the medium-calorie pyrolysis gas from biofuel can be used for the production of thermal or thermal and electrical energy.

Key words: biofuel, pyrolysis, gasification, fixed carbon, tar

ORCID: ¹0000-0002-1270-6102, ²0000-0003-0158-4696, ³0000-0001-9398-1968

У світі набувають розвитку технології термохімічної переробки гранульованого біопалива. Важливою умовою використання піролізного газу є мінімальний вміст смоли в ньому. Запропоновано два оригінальних способи виробництва з біомаси в одному реакторі двох різних за складом і теплотворною здатністю синтетичних газів: низькокалорійного – 5600–6000 кДж/нм³ та середньокалорійного – 14000 кДж/нм³ з низьким вмістом смол.

На рис. 1 зображено дві установки піролізу біопалива та пароповітряної газифікації фіксованого вуглецю. Було вдосконалено конструкцію установки тим, що: зменшили товщину міжтрубного простору; використали обертальний розпушувач частинок біомаси з металевих прутів; електронагрівач, розташований на зовнішній поверхні огорожувальної труби замінили на камеру згоряння коксозольних частинок вугілля в об'ємі повітря у киплячому шарі, а теплообмінник типу «труба в трубі» замінили на камеру киплячого шару зі зріджених частинок піску, що складається з решітки та огороженої металевої обичайки з торкретом, при цьому всередині киплячого шару розташовано змієвик, де відбувається процес риформінгу. Це дало змогу досягти значно меншого часу та більшої швидкості прогріву частинок біомаси, забезпечити руйнування кластерів, що утворюються на вході у міжтрубний простір, зменшити споживання електричної енергії та габарити теплообмінника, де відбувається процес риформінгу.

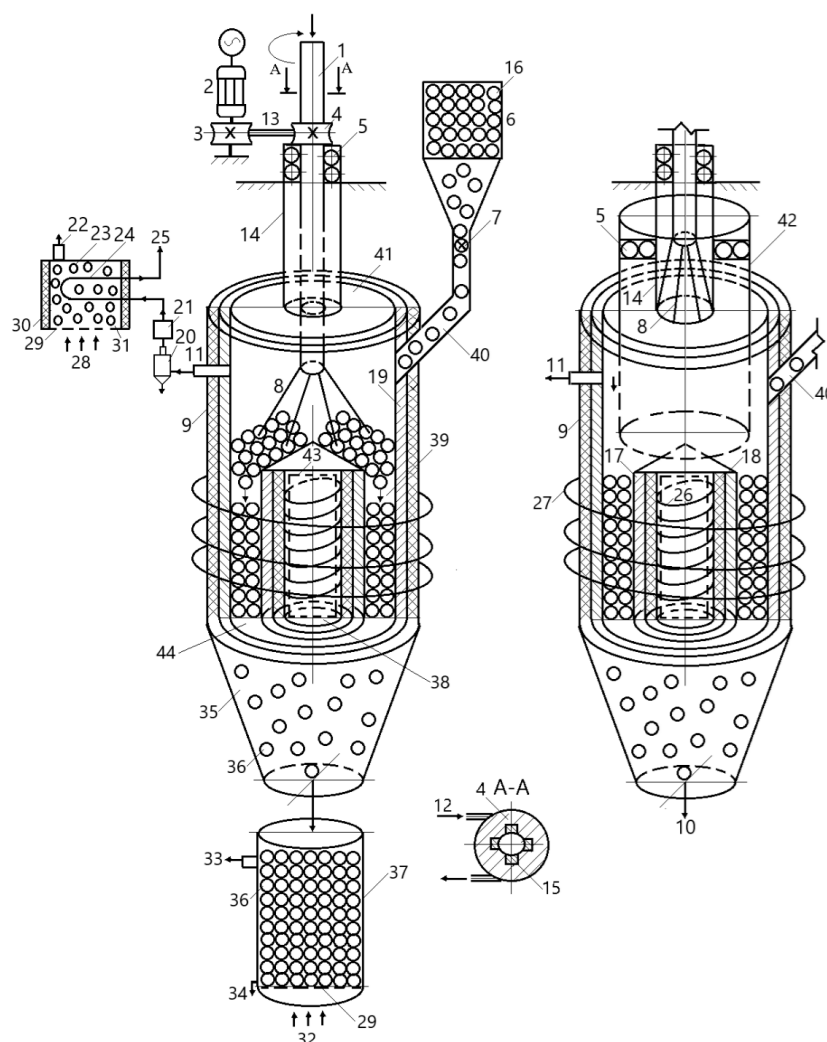


Рис. 1. Установки піролізу біопалива та пароповітряної газифікації фіксованого вуглецю.

Установки складаються з: валу 1, електродвигуна 2, шківів 3 і 4, підшипника 5, бункера підсушених частинок біомаси 6, живильника 7, металевої щітки (розпушувача) 8, ізоляції з кераміки на основі нітриту (або оксиду) алюмінію для зовнішньої труби 9, труби для перетікання коксозольних частинок біомаси з лійки до газифікатора 10, трубопроводу виходу сирого неочищеного піролізного газу 11, напрямку руху ремня 12, пасової передачі 13, футляра для розпушувача 14, хрестоподібної втулки 15, частинок біомаси 16, внутрішньої труби 17, ізоляції з кераміки на основі нітриту або оксиду алюмінію для внутрішньої труби 18, зовнішньої труби 19, циклона 20, високотемпературного фільтра для уловлення вугільної сажі 21, трубопроводу відхідних димових газів після киплячого шару 22, частинок піску 23, змійовика 24, труби виходу піролізного газу 25, електронагрівника для внутрішньої труби 26, електронагрівника для зовнішньої труби 27, труби для транспорту високотемпературних димових газів 28, решітки 29, металевої обичайки з торкретом 30, камери киплячого шару 31, трубопроводу для подачі пароповітряної суміші 32, трубопроводу для виходу генераторного газу 33, патрубку для вивантаження золи 34, лійки 35, коксозольних частинок біомаси 36, газифікатора 37, фланця 38, камери піролізу 39, точки для частинок біомаси 40, кришки 41, проштовхувача коксозольних частинок біомаси 42, керамічної втулки 43, шибера 44.

Експериментальна установка складається з камери піролізу 39, яка включає в себе, дві вісесиметричні труби, виготовлені з жароміцної сталі AISI310: внутрішньої 17 і зовнішньої 19 (Рис. 1, зліва). Зовнішню поверхню труби 19 та внутрішню поверхню труби 17 покрито керамічними ізоляціями 9 та 18 товщиною 2 мм. На зовнішній поверхні керамічної ізоляції 9 встановлюється електронагрівник 27, що складається з ніхромового дроту, намотаного у вигляді спіралі на поверхню ізольованої труби 19. Другий електронагрівник 26 розташовується всередині труби 17.

На початку розпалювання установки в газифікаторі 37 та у камері киплячого шару 31 формуються нерухомі шари із попередньо напрацьованих коксозольних частинок біомаси 36 та піску 23, після чого відбувається їх прогрівання до температур 600 °С та 950–1000 °С, відповідно, високотемпературною інертною газовою сумішшю, що подається під решітку газифікатора 29 та камери киплячого шару 29. Паралельно з цим починається прогрівання поверхонь нагріву піролізера до температури 960 °С за рахунок теплоти двох електронагрівників. Після прогрівання поверхонь

камери піролізу 39 відбувається засипка біопалива із бункера біомаси 6 до зовнішньої труби 19 за допомогою живильника 7. Частина фракцій біомаси попадає у тонкий кільцевий міжтрубний простір товщиною 15–20 мм, де розташована камера піролізу 39, а залишок частинок вихідного біопалива формує насип частинок (кластери) на вході у зазор між трубами 17 та 19. Для руйнування кластерів використовується розпушувач 8 з металевих гнучких прутів, який розміщений на обертальному валу 1 та металевий проштовхувач 42 (Рис. 1, зліва).

У початковому положенні розпушувач 8 перебуває в футлярі 14, а вал – у крайньому верхньому положенні. Після засипання палива у зовнішню трубу 19 вал 1 опускається донизу (Фіг. 1). Після чого включається електродвигун 2, на валу якого розташовано шків 3, що передає обертальний момент шківу 4, і, як наслідок, вал 1 через пасову передачу 13 починає обертатися, приводячи до обертального руху розпушувач 8, внаслідок чого відбувається руйнування кластерів та формування тонкого нерухомого шару у камері піролізу 39. Після чого вал 1 підіймається до верху і щітка 8 потрапляє у футляр 14. Після прогріву камери піролізу 39 до температури 960 °C та формування у ньому насипного шару частинок біопалива з температурою 100 °C товщиною 15–20 мм, від двох електронагрівників 26 та 27 підводяться постійні питомі теплові потоки 70000 та 60000 Вт/м² до внутрішньої поверхні керамічної ізоляції 18 і зовнішньої поверхні керамічної ізоляції 9, відповідно, на відміну від найближчого аналогу, де питомі теплові потоки різко падають від 150000 до 42360 Вт/м² у часовому діапазоні циклу, який дорівнює 40 с.

За такої організації процесу піролізу, наприклад, частинок тріски тополя еквівалентного діаметра 7 мм та густиною 400 кг/м³, у камері піролізу висотою 225 мм, розташованій між трубами 19 і 17 діаметрами 230×5 мм та 180×5 мм, поверхні яких покрито ізоляціями з кераміки товщиною 2 мм, час одного циклу процесу піролізу до досягнення мінімальної температури частинок тріски тополя 661 °C складає 18 с, швидкість прогріву до вказаної температури дорівнює 1870 °C/хв., а до середньої температури шару 810,5 °C, швидкість прогріву складає 2701,6 °C/хв. Остання величина свідчить про те, що вихід піролізного газу відбувається за більш високих температур, ніж у найближчого аналогу, внаслідок чого збільшується кількість піролізного газу. При такій організації термохімічного процесу температури зовнішньої поверхні керамічної ізоляції 9 та внутрішньої поверхні керамічної ізоляції 18 зменшуються з 960 до 948 °C та 960 до 950 °C відповідно. Для досягнення необхідної температури 960 °C, для початку наступного циклу діапазон процесу піролізу необхідно збільшити з 18 до 24 с. З камери піролізу 39 виходить неочищений сирій піролізний газ, який надходить у гарячий циклон 20, після чого він потрапляє у фільтр 21 для уловлення вугільної сажі.

Очищений піролізний газ, який складається з неконденсованої частини (CO, H₂, CO₂, CH₄, C₂H₄ тощо) і конденсованої частини, що містить високомолекулярні сполуки типу C₆H_{6,2}O_{0,2} прямує до змійовика 24, де відбувається процес риформінгу: високомолекулярні сполуки розкладаються на легкі гідрокарбони (CH₄, C₂H₄ тощо) за рахунок конвективно-кондуктивного та променевого теплообміну між киплячим шаром та поверхнею змійовика 24. Коксозольний залишок прямує до газифікатора 37, де відбувається конверсія коксу 36 в пароповітряному середовищі 32. Оскільки товщина камери піролізу 39 мала і становить лише 15–20 мм, для проштовхування коксозольних частинок біомаси з камери піролізу у лійку 35 використовується металевий проштовхувач 42. На виході з газифікатора 37 отримуємо неочищений низькокалорійний генераторний газ з теплотворною здатністю 5600–6000 кДж/нм³ (для берези – 5600 кДж/нм³), який практично не містить смол.

Головною відмінністю другої установки від першої є те, що для обігріву зовнішньої поверхні труби 19 піролізера використовується акумульована теплова енергія камери киплячого шару завдяки прогріву частинок золи (частинок металу або кераміки) димовими газами до температури 960 °C (Рис. 1, справа). Передача теплової енергії здійснюється за рахунок кондуктивного та променевого теплообміну між частинками золи (частинок металу або кераміки) та поверхнею труби 19, в той час коли киплячий шар перебуває у нерухомому стані або у стані мінімального псевдозрідження.

Висновки. Запропоновано два оригінальних способи виробництва з біомаси в одному реакторі двох різних за складом і теплотворною здатністю синтетичних газів: низькокалорійного – 5600–6000 кДж/нм³ та середньокалорійного – 14000 кДж/нм³ з низьким вмістом смол. Отриманий низькокалорійний синтетичний газ з коксозольних часток біопалива можна використати для власних потреб установки, а середньокалорійний піролізний газ із біопалива для виробництва теплової або теплової та електричної енергії.

УДК 621.311:620.92:628.4

ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ЗВАЛИЩНОГО ГАЗУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ГНУЧКОСТІ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ

М. А. Попков

*Інститут відновлюваної енергетики НАН України,
вул. Метрологічна, 50, м. Київ, 02094, Україна
Тел.: (068) 693-9616, e-mail: 2809maks2809@gmail.com*

У роботі розглянуто можливість використання звалищного газу як локального керованого енергетичного ресурсу для підвищення гнучкості локальних електроенергетичних систем. Показано, що поєднання систем збору звалищного газу, газових накопичувачів і газопоршневої генерації може створити додатковий інструмент для покриття пікових навантажень, зменшення навантаження на зовнішню мережу та підвищення енергетичної стійкості громад.

Ключові слова: *звалищний газ, локальна електроенергетична система, гнучкість, пікове навантаження, розподілена генерація, газовий накопичувач*

PROSPECTS FOR USING LANDFILL GAS TO INCREASE THE FLEXIBILITY OF LOCAL ELECTRIC POWER SYSTEMS

M. Popkov

*The Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine,
50 Metrolohychna str., Kyiv, Ukraine, 02094
Phone: (068) 693-9616, e-mail: 2809maks2809@gmail.com*

The paper considers the possibility of using landfill gas as a local dispatchable energy resource to increase the flexibility of local electric power systems. It is shown that the combination of landfill gas collection systems, gas storage tanks and gas-engine generation can create an additional tool for covering peak loads, reducing the load on the external grid and improving the energy resilience of communities.

Key words: *landfill gas, local electric power system, flexibility, peak load, distributed generation, gas storage tank*

ORCID: 0009-0006-3806-2102

Сучасний розвиток енергетики дедалі більше пов'язаний із переходом від централізованої моделі електропостачання до поєднання великих генерувальних потужностей, розподіленої генерації, накопичувачів енергії та активного керування споживанням. Для України це питання має не лише економічне, а й безпекове значення, оскільки локальні електроенергетичні системи можуть частково зменшувати залежність споживачів від стану магістральної мережі та забезпечувати кращу керованість навантаження у критичні періоди. У цьому контексті особливий інтерес становлять місцеві енергетичні ресурси, які вже наявні в межах громад, але використовуються неповною мірою.

Одним із таких ресурсів є звалищний газ, що утворюється на полігонах твердих побутових відходів у процесі анаеробного розкладання органічної складової відходів. За даними довідкових матеріалів з розвитку проєктів landfill gas energy, цей газ може збиратися, очищуватися та використовуватися для виробництва електричної й теплової енергії [1]. У ширшому контексті біогазові ресурси розглядаються як один із напрямів поєднання енергетичної політики, поводження з відходами та зменшення викидів парникових газів [2].

На відміну від сонячної та вітрової генерації, які залежать від метеорологічних умов, енергетичне використання звалищного газу має іншу природу гнучкості. Сам газ утворюється відносно поступово, але за наявності газгольдерів частина ресурсу може тимчасово накопичуватися і використовуватися тоді, коли локальна мережа потребує додаткової потужності. Це дає змогу розглядати систему "полігон - газозбірна мережа - газовий накопичувач - генератор" не тільки як об'єкт утилізації відходів, а як елемент керованої розподіленої генерації.

Практичне значення такого підходу особливо помітне під час покриття пікових навантажень. Для локальної електроенергетичної системи пікові періоди створюють додаткові вимоги до пропускну здатності мережі, ре-

зервування потужності та закупівлі електроенергії із зовнішньої системи. Якщо частина електричної енергії в ці години виробляється з місцевого газового ресурсу, зменшується миттєве навантаження на точку приєднання, а локальний оператор отримує додатковий інструмент балансування. Подібна логіка відповідає підходам до мікромереж, у яких розподілена генерація, накопичувачі та навантаження розглядаються як єдиний керований об'єкт [3].

Газовий накопичувач у такій системі виконує функцію проміжної ланки між неперервним утворенням газу та нерівномірним графіком споживання електроенергії. Його наявність дозволяє відмовитися від режиму постійної генерації з малою участю в балансуванні та перейти до керованішого режиму роботи. При цьому обсяг накопичувача, потужність генераторної установки, прогноз утворення газу і профіль локального навантаження повинні розглядатися спільно. Саме ця взаємозалежність формує основу подальших техніко-економічних розрахунків.

Окремою перевагою є екологічний ефект. Неконтрольоване виділення метану з полігонів або його просте факельне спалювання не створює корисного енергетичного продукту. Натомість використання звалищного газу в генерації дозволяє поєднати зменшення екологічного навантаження з отриманням локальної електроенергії. У такому випадку полігон ТПВ може розглядатися не лише як об'єкт поводження з відходами, а як частина енергетичної інфраструктури громади.

Для впровадження таких систем важливо враховувати і ринково-регуляторний контекст. В Україні розвиток розподіленої генерації, активних споживачів, балансувальних груп і систем зберігання енергії поступово створює умови для появи нових локальних моделей енергозабезпечення [4]. У перспективі генерація на звалищному газі може бути інтегрована до мікромережі, комунальної енергетичної системи або локального енергетичного кооперативу, якщо буде забезпечено технічне узгодження режимів роботи та економічну мотивацію учасників.

Водночас існують обмеження, які потребують окремого дослідження. До них належать нерівномірність утворення газу протягом життєвого циклу полігону, потреба в очищенні газу, капітальні витрати на газозбірну систему й генераторне обладнання, вимоги до безпеки газових накопичувачів, а також необхідність погодження роботи установки з режимами локальної електромережі. Тому перспективність такого рішення повинна оцінюватися не лише за величиною доступного енергетичного ресурсу, а й за здатністю системи забезпечити потрібний режим роботи саме в години пікового навантаження.

Висновки. Отже, використання звалищного газу для підвищення гнучкості локальних електроенергетичних систем є перспективним напрямом, що поєднує завдання розподіленої генерації, накопичення енергетичного ресурсу, утилізації відходів і підвищення стійкості електропостачання. Найбільш доцільним напрямом подальших досліджень є формування моделі роботи такої системи для конкретного полігону та локального споживача з урахуванням графіків навантаження, потенціалу утворення газу, обсягу газового накопичувача і режимів роботи генераторної установки.

ПОСИЛАННЯ

1. LFG Energy Project Development Handbook. U.S. Environmental Protection Agency, Landfill Methane Outreach Program, 2024. URL: <https://www.epa.gov/lmop/landfill-gas-energy-project-development-handbook>.
2. Outlook for Biogas and Biomethane. International Energy Agency, 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/outlook-for-biogas-and-biomethane>.
3. IEC TR 62898-1:2023. Microgrids - Part 1: Guidelines for microgrid projects planning and specification. International Electrotechnical Commission, 2023. 86 p.
4. Про ринок електричної енергії: Закон України від 13.04.2017 № 2019-VIII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2019-19#Text>.

УДК 621.311.25

ЦИФРОВА ГЕЙМІФІКАЦІЯ В ІНЖЕНЕРНІЙ ОСВІТІ: ВИКОРИСТАННЯ MINECRAFT ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ БУДІВНИЦТВА ІНЖЕНЕРНИХ МЕРЕЖ

В.І. Данилишин¹

¹ВСП «Техніко-економічний фаховий коледж НУ «Львівська політехніка», 79000, Львів, Львівська область, вулиця Пасічна, 87

Використання гейміфікації як інноваційного інструменту підвищення ефективності освітнього процесу під час підготовки фахівців у галузі будівництва та інженерних мереж є важливим елементом у сучасній освіті. На сьогодні доцільно інтегрувати цифрові ігрові середовища у професійну освіту з метою формування практичних компетентностей та результатів навчання, розвитку просторового та інженерного мислення здобувачів освіти. Особливу увагу необхідно приділяти використанню освітньої версії гри Minecraft як інструменту моделювання інженерних систем та технологічних процесів будівництва. Застосування ігрового середовища дозволяє візуалізувати складні технологічні процеси, моделювати будівельні генеральні плани та елементи інженерних мереж, що сприяє кращому розумінню професійних дисциплін. Використання гейміфікації підвищує мотивацію студентів до навчання, активізує їхню пізнавальну діяльність та сприяє формуванню практикоорієнтованих навичок, необхідних для підготовки сучасних фахівців у сфері енергоефективного будівництва та інженерної інфраструктури.

Ключові слова: гейміфікація, цифрові освітні технології, Minecraft, інженерні мережі, професійна освіта, енергоефективність, інноваційні методи навчання.

DIGITALIZATION OF THE EDUCATIONAL PROCESS - CURRENT TRENDS AND A LOOK INTO THE FUTURE

V. I. DANYLYSHYN¹

¹Technical and Economic College of Lviv Polytechnic National University, 87 Pasichna Street, Lviv, Lviv region, 79000

The use of gamification as an innovative tool for improving the efficiency of the educational process in the training of specialists in the field of construction and engineering networks is an important element of modern education. Today, it is advisable to integrate digital gaming environments into professional education in order to develop practical competencies and learning outcomes, as well as to enhance the spatial and engineering thinking of students. Special attention should be paid to the use of the educational version of the game Minecraft as a tool for modeling engineering systems and technological processes in construction. The use of a gaming environment makes it possible to visualize complex technological processes, model construction master plans and elements of engineering networks, which contributes to a better understanding of professional disciplines. The application of gamification increases students' motivation to learn, activates their cognitive activity, and promotes the development of practice-oriented skills necessary for training modern specialists in the field of energy-efficient construction and engineering infrastructure.

Keywords: gamification, digital educational technologies, Minecraft, engineering networks, professional education, energy efficiency, innovative teaching methods.

ORCID: ¹ 0009-0006-7193-0610

У XXI столітті розвиток відновлювальної енергетики та енергоефективних технологій вимагає підготовки фахівців, які володіють не лише професійними знаннями, а й цифровими компетентностями. Одним із ефективних підходів модернізації освітнього процесу є гейміфікація навчання, що передбачає використання ігрових платформ для підвищення мотивації здобувачів освіти та залучення їх до активного, сучасного та інноваційного навчання.

Гейміфікація – це застосування елементів гри у неігровому середовищі, зокрема в освіті. На відміну від традиційних методів навчання, вона дозволяє створити інтерактивне середовище, у якому студенти активно взаємодіють із навчальним матеріалом та моделюють професійні ситуації [1].

Одним із ефективних інструментів гейміфікації є використання освітньої версії популярної комп'ютерної гри Minecraft. За статистичними даними, щомісячна аудиторія гри перевищує 170 млн користувачів, що робить її однією з найпопулярніших платформ для інтерактивного навчання [2]. Освітня версія Minecraft (Minecraft Education Edition) створена компанією Microsoft саме для використання у навчальному процесі.

У професійній освіті, зокрема при підготовці фахівців будівельної галузі, Minecraft може використовуватися для моделювання інженерних систем та технологічних процесів. Наприклад, під час вивчення дисциплін професійного спрямування студенти можуть створювати віртуальні моделі будівельних генеральних планів, інженерних мереж або технологічних схем будівництва. У досвіді викладання інженерних мереж здобувачі освіти проектували будівельний генеральний план прокладання підземного газопроводу, поєднуючи проектування у AutoCAD з подальшою візуалізацією об'єкта у середовищі Minecraft (рис.1)

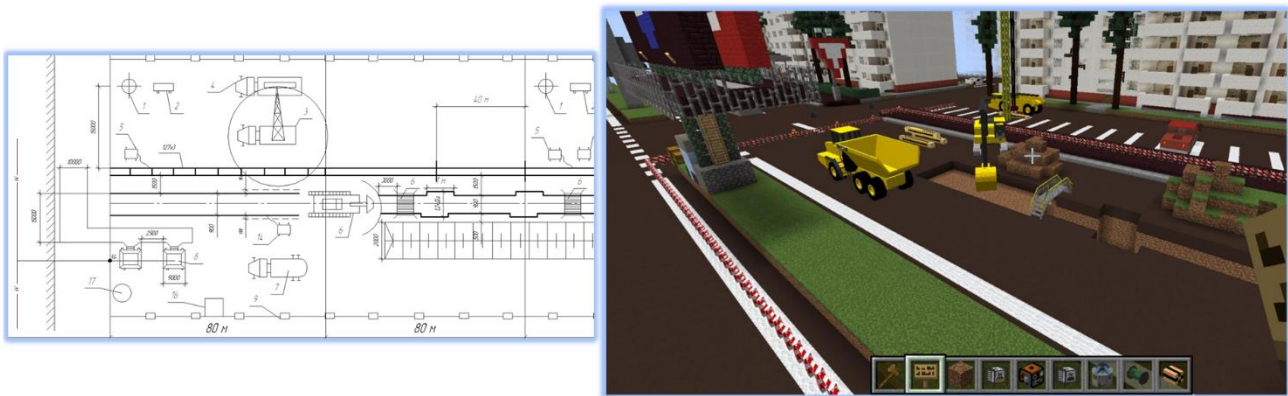


Рис.1 Проектування будівельного генерального плану у грі Minecraft

Такий підхід дозволяє студентам краще зрозуміти просторову організацію будівельного майданчика, послідовність виконання технологічних процесів та принципи функціонування інженерних систем. Крім того, використання ігрового середовища сприяє розвитку просторового мислення, командної роботи та творчого підходу до вирішення інженерних задач. Використання гейміфікації в освітньому процесі підвищує мотивацію студентів, формує практичні компетентності та сприяє інтеграції цифрових технологій у підготовку майбутніх фахівців у сфері енергоефективного будівництва та інженерних мереж.

Minecraft також можна ефективно використовувати під час вивчення відновлювальних джерел енергії та енергоефективних технологій. У віртуальному ігровому середовищі здобувачі освіти мають можливість проектувати та моделювати різні енергетичні системи, зокрема сонячні електростанції, вітрові турбіни, малі гідроелектростанції, а також енергоефективні будівлі. За допомогою таких моделей студенти можуть візуалізувати принципи виробництва, розподілу та використання енергії з відновлювальних джерел. Додатково використання Minecraft у навчальному процесі дозволяє створювати моделі енергоефективних населених пунктів або будівельних об'єктів, де студенти можуть аналізувати споживання енергії, оптимізувати розміщення відновлюваних джерел енергії та оцінювати ефективність різних інженерних рішень у змодельованому середовищі.

Крім того, моделювання у середовищі Minecraft дозволяє експериментувати з різними варіантами розміщення енергетичних установок, аналізувати їх ефективність та розуміти вплив на навколишнє середовище. Такий підхід сприяє формуванню екологічного мислення, розумінню принципів сталого розвитку та розвитку практичних навичок проектування енергоефективної інженерної інфраструктури.

ПОСИЛАННЯ

1. Games vs Game-based Learning vs Gamification [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://goo.gl/F0nf7>
2. Minecraft у школі: як діти вчать за допомогою популярної гри [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://osvitoria.media/experience/minecraft-u-shkoli-yak-dity-vchatsya-za-dopomogoyu-populyarnoyi-gry/>

METHODOLOGY FOR DEVELOPING STUDENTS SYSTEMATIC ANALYSIS SKILLS IN STUDYING MAXWELL–LORENTZ EQUATIONS

Sevarakhon Bakirova¹, Azizjon Kurbanov²

Andijan state university,

129 University str., Andijan, Uzbekistan, 170100

phone: (+99894) 867-81-67, e-mail: sbakirova471@gmail.com

Abstract

This paper presents a methodology for developing systemic analysis skills in university students during the study of Maxwell–Lorentz equations within the Electrodynamics course. The research employs system-structural approach, problem-based learning, pedagogical observation, and diagnostic analysis methods. The proposed methodology contributes to students' understanding of the electromagnetic field as an integrated physical system, enhances their ability to interpret the relationship between mathematical expressions and physical meaning, and develops skills in identifying cause-and-effect relationships.

Keywords: electrodynamics, Maxwell–Lorentz equations, systemic analysis, problem-based learning, pedagogical methodology, higher education.

The strategy for developing the education system in our country is aimed at forming a knowledgeable, highly moral, and competitive generation. In this context, the widespread implementation of innovative and information-communication technologies, improving the quality and efficiency of education, and aligning it with international standards are considered priority tasks. Currently, many modern pedagogical technologies are being applied in education. The implementation of such advanced methods in teaching physics increases teaching effectiveness, enhances student engagement, and develops their independent thinking skills. Therefore, studying the role and importance of modern pedagogical technologies in physics education is of great relevance [1].

One of the key objectives of modern physics education is not to make students memorize ready-made formulas, but to teach them to deeply and systematically understand physical processes. In the Electrodynamics course, Maxwell–Lorentz equations unify electric and magnetic phenomena into a single theoretical framework. However, practice shows that students often perceive these equations as separate formulas and fail to fully understand their internal logical connections. At this stage of the research, a methodological model was developed, along with a mechanism for its experimental implementation.

Methodology

The topic of “Maxwell–Lorentz equations” is one of the most important topics in the Electrodynamics course. It enables students to understand the unified theory of the electromagnetic field, comprehend the relationship between force and charge, grasp the unity of mathematical expressions and physical meaning, predict electromagnetic processes, and view physical phenomena as a system.

The differential form of Maxwell–Lorentz equations in the Gaussian system of units is given as:

- 1) $\operatorname{rot} E = - (1/c) \partial H / \partial t$
- 2) $\operatorname{div} H = 0$
- 3) $\operatorname{rot} H = (4\pi/c) j + (1/c) \partial E / \partial t$
- 4) $\operatorname{div} E = 4\pi\rho$

These equations form a unified theory of the electromagnetic field. The proposed methodology is based on the systemic analysis of the interrelations among these equations [2]. In this approach, each equation is studied not in isolation but through cause-and-effect relationships. For example, the generation of a magnetic field by a time-varying electric field is explained through Faraday's law of induction, which promotes systemic thinking in students.

Thus, the methodological foundation of the research is the system-structural approach. According to this approach, the following tasks were set:

- conducting a didactic analysis of Maxwell–Lorentz equations;
- developing a system-structural model;
- creating a bank of systemic questions;
- developing assessment criteria.

Theoretical methods:

- systemic and structural analysis of educational material;
- comparative study of differential and integral forms of Maxwell's equations;
- identifying the relationship between physical meaning and mathematical representation.

Empirical methods:

- problem-based learning technology;
- pedagogical observation.

Data processing:

Pedagogical experimental work is planned for the next stage.

Content and Stages of the Methodology

The proposed methodology includes the following stages:

1. Analysis of the physical situation – identifying electric charges, currents, and field sources.
2. Identification of system elements – determining relationships between electric field, magnetic field, current density, and charge density.
3. Revealing cause-and-effect relationships – explaining how a changing electric field generates a magnetic field and vice versa.
4. Physical interpretation of mathematical expressions – explaining the physical meaning of each equation.
5. Generalization and systematization – considering the four equations as a unified electromagnetic theory.

Students are guided toward independent conclusions through problem-based questions, such as: “*What physical process occurs if a time-varying electric field exists?*” This activates systemic thinking.

Research Results

During the research, a methodological model based on systemic analysis for teaching Maxwell–Lorentz equations was developed. Diagnostic criteria and evaluation indicators were designed for testing this model in pedagogical experiments.

Criteria for assessing systemic analysis skills:

- ability to identify elements of physical processes;
- ability to explain cause-and-effect relationships;
- ability to relate mathematical expressions to physical meaning;
- ability to demonstrate internal connections between equations.

Conclusion

In this study, a methodological model based on systemic analysis for teaching Maxwell–Lorentz equations was developed. Diagnostic criteria and evaluation indicators were proposed for its experimental validation. The developed methodology facilitates the systemic teaching of Maxwell–Lorentz equations and promotes the structural development of students' thinking. This approach enables students to perceive electromagnetic phenomena as an integrated system and increases the effectiveness of the Electrodynamics course.

REFERENCES

1. Ibragimova N.O. *The role of modern pedagogical technologies in teaching physics*.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.11091737>
2. Kurbanov A.O. (2024). *Electrodynamics: Educational and methodological complex*. Andijan State University.

УДК 620.92:371.3

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ «LEARNING BY DESIGN» ДЛЯ РОЗРОБКИ КУРСУ З ПРОЄКТУВАННЯ БУДІВЕЛЬ З МАЙЖЕ НУЛЬОВИМ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ (NZEB)

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*

У роботі розглянуто процес розробки навчального курсу для вчителів з проєктування будівель з майже нульовим рівнем енергоспоживання (NZEB) у рамках проєкту REBUILD. Описано застосування методу навчання через проєктування (learning by design) за допомогою онлайн-платформи Aladdin.

Ключові слова: енергоефективність будівель, відновлювані джерела енергії, сонячна енергетика, майже нульове енергоспоживання будівлі (NZEB), навчання через проєктування, онлайн-платформа Aladdin, проєкт REBUILD

APPLICATION OF THE "LEARNING BY DESIGN" METHOD FOR DEVELOPING A COURSE ON DESIGNING NEARLY ZERO-ENERGY BUILDINGS (NZEB)

O. V. Lysak

*Institute of Renewable Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine,
50 Metrolohichna str., Kyiv, Ukraine, 03143
phone: (044) 206-28-09, e-mail: oleg.v.lysak@gmail.com*

This paper examines the process of developing a training course for teachers on the design of nearly zero-energy buildings (NZEB) as part of the REBUILD project. It describes the application of the "learning by design" method using the Aladdin online platform.

Key words: building energy efficiency, renewable energy sources, solar energy, nearly zero-energy building (NZEB), learning by design, Aladdin online platform, REBUILD project.

ORCID: 0000-0002-4934-0685.

Вступ. Сфера енергоефективності будівель та відновлюваної енергетики є актуальною для України. Внаслідок російських атак на вітчизняну енергетичну інфраструктуру питання зниження енергоспоживання будівель та впровадження систем розподіленої генерації, зокрема дахових сонячних електростанцій, набувають першочергового значення. Формування таких компетенцій стає необхідним вже у шкільному віці, що, зокрема, відображено в інтеграції тематики енергоефективності будівель у навчальний процес закладів загальної середньої освіти України 2025 році [1].

Водночас у сучасній освіті дедалі більше уваги приділяється переходу від запам'ятовування фактів до їх засвоєння через практичне навчання. Такий підхід формує у здобувачів освіти навички розв'язання проблем на прикладі реальних інженерних задач [2].

Метою роботи є розробка навчального курсу для вчителів з проєктування енергоефективної будівлі з майже нульовим рівнем енергоспоживання (англ. nearly zero-energy building, NZEB) у рамках проєкту REBUILD. Цей курс покликаний стати основою для позакласних занять, які вчителі зможуть самостійно проводити у школах за цим напрямом.

Концепція навчання. В основі запропонованого підходу лежить метод навчання через проєктування (англ. learning by design), що передбачає практичне ітеративне набуття навичок у досліджуваній сфері за допомогою онлайн-платформи Aladdin [3–5], розробленої одним з учасників проєкту REBUILD – Institute for Future Intelligence (США). Ця онлайн-платформа, зокрема, дозволяє створювати 3D-модель об'єкта, інтегрувати сонячні панелі та аналізу-

вати тепловтрати й теплонадходження крізь зовнішні огорожувальні конструкції будівлі, а також генерацію електроенергії сонячними панелями. У межах проєкту зазначений метод наразі адаптовано для впровадження за такими етапами:

1. На першому етапі вчителі вивчають показники за якими характеризують енергоспоживання будівлі. Згодом вони закріплюють теоретичні знання, самостійно створюючи в онлайн-платформі Aladdin базову 3D-модель будівлі та аналізуючи зміни її енергоспоживання залежно від обраного місця розміщення будівлі із характеристиками зовнішніх огорожувальних конструкцій «за замовчуванням».
2. Наступним кроком фокус зміщується на будівельну теплофізику та термомодернізацію. Опанувавши такі концепції, як термічний опір R , $\text{м}^2\cdot\text{К}/\text{Вт}$, та коефіцієнт теплопередачі U , $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$, в онлайн-платформі Aladdin вчителі експериментують із теплофізичними властивостями зовнішніх огорожувальних конструкцій з урахуванням чинних нормативних вимог. Вони моделюють будівлі складної геометрії, налаштовують теплові режими об'єкта та порівнюють його енергоспоживання «до» та «після» термомодернізації.
3. Після мінімізації енергоспоживання шляхом зменшення тепловтрат та теплонадходжень крізь зовнішні огорожувальні конструкції будівлі, вчителі переходять до забезпечення енергетичних потреб будівлі за допомогою відновлюваних джерел енергії, а саме сонячних панелей. Таким чином, їхній проєкт наближається до концепції NZEB: спочатку зменшується базове енергоспоживання, а залишкові потреби покриваються за рахунок відновлюваних джерел. Онлайн-платформа Aladdin дозволяє як розрахувати генерацію електроенергії сонячними панелями, так і використати віртуальний геліодон для динамічної оцінки того, як затінення від самої будівлі чи зовнішніх об'єктів впливає на ефективність сонячних панелей та загальний теплообмін.

Висновок. Розроблена методика спрямована на засвоєння теоретичних знань через практичне використання онлайн-платформи Aladdin для комплексного проектування будівель формату NZEB. Це сприятиме формуванню компетенцій з енергоефективності будівель та сонячної енергетики в межах шкільних позакласних занять.

Подяка. Робота виконана в рамках проєкту УНТЦ №7135 «REBUILD», який отримав фінансування від Національної академії наук (англ. National Academy of Sciences, NAS) США в рамках програми «Міжнародне багатостороннє партнерство для забезпечення стійкості системи освіти і науки в Україні» (англ. International Multilateral Partnerships for Resilient Education and Science System in Ukraine, IMPRESS-U). Будь-які думки, висновки та рекомендації, висловлені в цьому матеріалі, належать авторам і не обов'язково відображають точку зору NAS.

ПОСИЛАННЯ

43. Готові матеріали для впровадження енергоефективності в школах (24 липня 2025). Міністерство освіти і науки України. URL: <https://mon.gov.ua/news/hotovi-materialy-dlia-vprovadzhennia-enerhoefektyvnosti-v-shkolakh> (дата звернення: 30.03.2026).
44. Kolodner J. L. et al. Problem-Based Learning Meets Case-Based Reasoning in the Middle-School Science Classroom: Putting Learning by Design(tm) Into Practice. *Journal of the Learning Sciences*. 2003. Vol. 12, no. 4. P. 495–547. DOI: https://doi.org/10.1207/s15327809jls1204_2
45. Xie C. et al. Learning and teaching engineering design through modeling and simulation on a CAD platform. *Computer Applications in Engineering Education*. 2018. Vol. 26, no. 4. P. 824–840. DOI: <https://doi.org/10.1002/cae.21920>
46. Xie C., Ding X., Jiang R. Using Computer Graphics to Make Science Visible in Engineering Education. *IEEE Computer Graphics and Applications*. 2023. Vol. 43, no. 5. P. 99–106. DOI: <https://doi.org/10.1109/mcg.2023.3298386>
47. Sereviene E. et al. Introducing Engineering Design to First-Year Students Through the Net Zero Energy Challenge. *Journal of College Science Teaching*. 2024. Vol. 53, no 5. P. 507–515. DOI: <https://doi.org/10.1080/0047231x.2024.2380302>

УДК 628.336.6

ОТРИМАННЯ БІОПАЛИВА З ВІДХОДІВ ПЕРЕРОБКИ СОЇ ТА ПІСЛЯСПИРТОВОЇ БАРДИ ЯК ПЕРСПЕКТИВНИХ БІОЕНЕРГЕТИЧНИХ РЕСУРСІВ

О. Р. Багнюк¹, С. М. Гармаш²

¹Дніпропетровське відділення Малої академії наук України

²Український 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 відходів переробки сої та післяспиртової барди; визначено вихід біогазу та вмісту метану.

Ключові слова: подрібнена соломка сої, некондиційне зерно сої, післяспиртова барда, вихід біогазу, вміст метану.

OBTAINING BIOFUEL FROM SOYBEAN PROCESSING WASTE AND DISTILLERAGE GRAINS AS PROMISING BIOENERGY RESOURCES

O. R. Bagnyuk¹, S. M. Garmash²

¹Junior Academy of Sciences of Ukraine (Dnipropetrovsk Department)

²Ukrainian State University of Science and Technology

St. Lazaryana, 2, Dnipro, 49000, Ukraine

phone: (095) 538-71-38, e-mail: svgarmash@ukr.net

Laboratory studies have been carried out to obtain biogas from soybean processing waste and post-alcohol stillage. The biogas yield and methane content were determined.

Key words: chopped soybean straw; substandard soybean grain; distillery dregs, biogas yield, methane content.

ORCID: ¹0009-0008-6100-3172; ²0000-0002-2658-162X.

У 2024 році в Україні було зібрано понад 6 млн. тон сої з отриманням близько 2 млн. тон відходів соломи – потенційного джерела біопалива [1]. Європейський сектор біометану планує виробити 35 млрд. м³ біометану в 2030 році [2]. Свіжозібране зерно сої має високу вологість, що призводить до швидкого псування зернової маси. Барда, що утворюється під час виробництва спирту, є рідким відходом (суспензією), об'єми якого складають близько 13 літрів на 1 літр виробленого спирту.

У кожній частині світу є значні можливості для виробництва біогазу. Згідно з прогнозами міжнародних організацій доступність сировини для виробництва біогазу зростає на 40% у період до 2040 року [3]. Встановлено, що проблема ефективної утилізації багатотоннажних відходів сої та післяспиртової барди не вирішена в багатьох країнах світу.

Барда містить різноманітні мікроорганізми, зокрема бактерії та дріжджі, певні види грибів, які відіграють роль у процесах ферментації. Для цих мікроорганізмів соєві відходи, що містять вуглеводи і білки, можуть бути живильним середовищем, що сприяє процесу біотрансформації соломи та некондиційного зерна сої, післяспиртової барди і отриманню біогазу.

Для виконання завдання з отримання біопалива проведено дослідження з відходів після збору врожаю сої (соломи та некондиційної сої) та післяспиртовою бардою, які підтвердили синергетичну взаємодію між цими відходами.

В термошафі встановили ємність об'ємом 1 л з досліджуваною біомасою сої (або суміші сої та барди), герметично закривали пробкою з трубкою, що з'єднує ємність, гідрозатвор і колбу-приймач газу. Колбу-приймач і мерник газу заповнювали водою. В термошафі підтримували температуру 50°C. Об'єм газу визначали за обсягом витиснутої рідини з колби-приймача у мірник газу. Вміст біогазу визначали на газовому хроматографі ЛХМ-80.

Результати досліджень отримання біогазу з відходів соломи сої та некондиційного зерна сої представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Вихід біогазу при використанні біомаси на основі відходів сої

Найменування сировини	Вихід біогазу на 1 кг сухої речовини, дм ³ /кг	Вміст метану, %
<i>Солома сої</i>		
Дослід 1	63,5	53

Дослід 2	61,4	55
Дослід 3	64,2	52
Середнє значення	63,0	53
<i>Некондиційне зерно сої</i>		
Дослід 1	74,6	54
Дослід 2	72,1	53
Дослід 3	75,3	58
Середнє значення	74,0	56

Результати досліджень отримання біогазу з відходів соломи сої та некондиційного зерна сої в суміші з бардою представлено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Вихід біогазу при використанні біомаси на основі відходів сої і барди

Найменування сировини	Вихід біогазу на 1 кг сухої речовини, дм ³ /кг	Вміст метану, %
<i>Подрібнена солома сої з бардою (50:50)</i>		
Дослід 1	81,5	55
Дослід 2	79,4	57
Дослід 3	82,2	57
Середнє значення	81,1	56
<i>Некондиційне зерно сої з бардою (50:50)</i>		
Дослід 1	92,3	56
Дослід 2	94,5	57
Дослід 3	91,8	60
Середнє значення	93,0	58

Результати експериментів свідчать, що вихід біогазу на 1 кг сухої речовини відходів соломи сої в середньому складає 63 дм³, вміст метану 53 %, що свідчить про доцільність використання цих відходів для отримання біогазу. вихід біогазу на 1 кг сухої речовини некондиційного зерна сої в середньому складає 74 дм³, вміст метану 56 %.

При отриманні біогазу із сировини на основі подрібненої соломи сої з бардою (50:50) вихід біогазу складає 81,1 дм³, вміст метану 56 %, на основі некондиційного зерна сої з бардою (50:50) – 93 дм³, вміст метану 58 %. Таким чином, при використанні субстратів відходів сої і барди вихід біогазу збільшується на 16-17 %.

Результати досліджень показали, що ефективним методом біоконверсії відходів сої є застосування методу анаеробного бродіння соломи сої та некондиційного зерна сої сумісно з бардою – відходами після перегонки спирту. Виробництво біогазу створює можливості утилізації багатотоннажних відходів сої і барди та може вирішити проблему дефіциту паливних ресурсів.

ПОСИЛАННЯ

1. Урожай сої в Україні 2024: рекордна кількість попри зниження врожайності
<https://www.agronom.com.ua/urozhaj-soyi-v-ukrayini-2024-rekordna-kilkist-popry-znyzhennya-vrozhajnosti> (дата звернення: 15.12.2025).
2. Гелетуа Г. Г., Кучерук П. П., Матвеев Ю. Б. 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: 10.12.2025).
3. Купчук І. М., Гонтарук Я. В., Присяжнюк Ю. С. Перспективи підвищення рівня енергетичної автономії переробних підприємств АПК України за рахунок виробництва біогазу. Техніка, енергетика, транспорт АПК. 2022. № 3 (118). С. 59–73. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-3-8.

УДК 621.548

МІКРО ВЕС ЯК ЕЛЕМЕНТ “ЗЕЛЕНОГО ПЕРЕХОДУ” ВОЛИНІ: ВІД РЕГІОНАЛЬНОЇ СТРАТЕГІЇ ДО ЛОКАЛЬНИХ ПРАКТИК

В. А. Гречко, О. О. Сад

*Міністерство освіти і науки України
Управління освіти і науки Волинської облдержадміністрації
Комунальна установа «Волинська обласна Мала академія наук»
Департамент освіти Луцької міської ради
Комунальний заклад загальної середньої освіти
«Заборольський ліцей № 32 Луцької міської ради»
вул. Володимирська 47-А, 45623, Україна,
тел.: (063)538-62-64, e-mail: vladga2011@gmail.com*

Дослідницьку роботу присвячено теоретичному дослідженню та практичній реалізації мікровітрової електростанції з турбіною вертикального типу, яка працює в умовах міської забудови, наприклад, на балконі, в місцях з постійними вітровими потоками. Метою роботи є аналіз енергетики Волині та її трансформації у сучасному контексті, а також вибір компонентів та проектування моделі мікро-ВЕС за допомогою технології 3d-друку.

Ключові слова: ВЕС, мікрогенерація, вітровий коридор, 3D-друк, вертикально-осьові вітрові турбіни.

MICRO WIND POWER PLANTS AS AN ELEMENT OF THE “GREEN TRANSITION” IN VOLYN: FROM REGIONAL STRATEGY TO LOCAL PRACTICES

V. A. Hrechko, O. O. Sad

*Ministry of Education and Science of Ukraine
Department of Education and Science of the Volyn Regional State Administration
Municipal Institution “Volyn Regional Junior Academy of Sciences”
Department of Education of the Lutsk City Council
Municipal General Secondary Education Institution
“Zaborol Lyceum No. 32 of the Lutsk City Council”
Volodymyrska St., 47-A, 45623, Ukraine
tel.: (063) 538-62-64, e-mail: vladga2011@gmail.com*

The research is devoted to the theoretical study and practical implementation of a micro wind power plant with a vertical-axis turbine, designed to operate in urban environments, for example on a balcony, in places with constant wind flows. The aim of the work is to analyze the energy sector of Volyn and its transformation in the modern context, as well as to select components and design a model of a micro wind power plant using 3D printing technology.

Keywords: wind power plant, microgeneration, wind corridor, 3D printing, vertical-axis wind turbines.

ORCID: 0000-0003-4821-7654

Мікровітрові електростанції (мікро-ВЕС) є важливим елементом сучасного енергетичного переходу, орієнтованого на зменшення залежності від викопних джерел енергії та підвищення енергетичної незалежності регіонів. В умовах Волинської області, яка має помірний, але стабільний вітровий потенціал, використання мікро-ВЕС розглядається як перспективний напрям розвитку локальної відновлюваної енергетики [1]. Їх застосування особливо актуальне для сільських територій, малих громад, приватних домогосподарств та об'єктів соціальної інфраструктури.

Регіональна енергетична стратегія Волині передбачає поступове впровадження принципів «зеленого переходу», що відповідає загальноєвропейським цілям щодо зменшення викидів вуглецю. У цьому контексті мікро-ВЕС виконують не лише технічну, а й соціально-економічну функцію, сприяючи децентралізації енергопостачання, зниженню втрат у мережах та підвищенню енергетичної безпеки на місцевому рівні. Використання таких установок

дозволяє залучати громади до процесів енергетичного планування та формувати відповідальне ставлення до споживання ресурсів.

Технічні особливості мікро-ВЕС полягають у відносно невеликих розмірах, потужності та можливості встановлення в умовах обмеженого простору. Сучасні конструкції адаптовані до змінних швидкостей вітру, мають низький рівень шуму та можуть працювати автономно або в складі гібридних енергосистем разом із сонячними панелями та накопичувачами енергії [2]. Це робить їх придатними для використання в регіонах із нестабільними погодними умовами, зокрема на території Волині.

Економічна доцільність впровадження мікро-ВЕС визначається зниженням витрат на електроенергію в довгостроковій перспективі, можливістю часткової або повної енергетичної автономії та скороченням викидів парникових газів. Хоча початкові інвестиції можуть бути значними, підтримка з боку державних і регіональних програм, а також розвиток технологій поступово зменшують бар'єри для їх поширення. Важливу роль відіграє й інформування населення щодо переваг відновлюваної енергетики [3].

Екологічний аспект використання мікро-ВЕС полягає у мінімальному впливі на довкілля порівняно з традиційними джерелами енергії. Такі установки не потребують спалювання палива, не утворюють шкідливих викидів та сприяють збереженню природних ресурсів. За умови правильного розміщення та дотримання технічних норм їх вплив на ландшафт і біорізноманіття є незначним, що відповідає принципам сталого розвитку регіону.

Практичний досвід упровадження мікро-ВЕС у Волинській області свідчить про доцільність їх використання як доповнення до існуючих енергетичних систем. Локальні практики демонструють можливість адаптації технологій до конкретних умов територій, що сприяє підвищенню ефективності енергоспоживання та розвитку інноваційних підходів у регіональній політиці. У перспективі мікро-ВЕС можуть стати важливою складовою енергетичного балансу Волині та прикладом успішної реалізації «зеленого переходу» на місцевому рівні.

ПОСИЛАННЯ

1. Атласи вітрів та карти енергетичного потенціалу України: кліматичні дані Волинської області. URL: https://voladm.gov.ua/admin-assets/files/file/Information%20for%20publication/___Volyn%20CM%20JTPlan%2021.10.df (дата звернення 25.10.25)
2. Кривцов В. С. Невичерпна енергія. Кн. 2. Вітроенергетика В. С. Кривцов, А. М. Олейніков, А. І. Яковлев. Харків, 2004. 396 с.
3. План дій зі справедливої трансформації Волинського вугільного мікрорегіону Волинської області на період до 2030 року. Луцьк, 2021. URL: https://voladm.gov.ua/admin-assets/files/file/Information%20for%20publication/___Volyn%20CM%20JTPlan%2021.10.pdf (дата звернення 18.10.25)

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ
НА ДВОХОСЬОВИХ ТРЕКЕРАХ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ
ПЛОСКОГО ДЗЕРКАЛЬНОГО ВІДБИВАЧА**

П. Є. Кондратюк, П. М. Шеремет

*Центральноукраїнський науковий ліцей Кіровоградської обласної ради,
вул. Театральна, 7, м. Кропивницький, 25000, Україна,
тел.: (0522) 30-54-34, e-mail: kondratukpolina11@gmail.com*

А. С. Ткаченко, О. І. Сіріков¹

*Центральноукраїнський національний технічний університет,
пр. Університетський, 8, м. Кропивницький, 25006, Україна,
тел.: (0522) 39-04-61, e-mail: asirikov@i.ua*

Досліджено підвищення ефективності фотоелектричних систем на двохосьових трекерах шляхом використання плоского дзеркального відбивача. Виведено аналітичну залежність для визначення оптимального кута нахилу відбивача, яка експериментально підтверджена. Також експериментально підтверджений приріст генерованої потужності сонячною панеллю.

Ключові слова: сонячна панель; двохосьовий трекер; плоский дзеркальний відбивач; концентрація випромінювання; оптимізація параметрів; кут нахилу; генерація електроенергії.

**INCREASING THE EFFICIENCY OF ELECTRICITY GENERATION BY SOLAR PANELS ON TWO-AXIS
TRACKER BY OPTIMIZING THE PARAMETERS OF THE FLAT MIRROR REFLECTOR**

P. E. Kondratyuk, P. M. Sheremet

*Central Ukrainian Scientific Lyceum of the Kirovohrad Regional Council,
7 Teatralna St., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25000
phone: (0522) 30-54-34, e-mail: kondratukpolina11@gmail.com*

A. S. Tkachenko, O. I. Sirikov

*Central Ukrainian National Technical University,
8 Universytetsky Ave., Kropyvnytskyi, Ukraine, 25006
phone: (0522) 39-04-61, e-mail: asirikov@i.ua*

The increase in the efficiency of photovoltaic systems on two-axis trackers by using a flat mirror reflector has been investigated. An analytical dependence has been derived to determine the optimal angle of inclination of the reflector, which has been experimentally confirmed. The increase in the power generated by the solar panel has also been experimentally confirmed.

Key words: solar panel; two-axis tracker; flat mirror reflector; radiation concentration; parameter optimization; tilt angle; electricity generation.

ORCID: ¹0000-0002-7058-2697.

В сучасних умовах стрімкого розвитку відновлюваної енергетики особливого значення набуває підвищення ефективності фотоелектричних систем. Сонячна енергетика демонструє стабільне зростання як у світі, так і в Україні, що зумовлено зниженням вартості фотоелектричних модулів та зростанням попиту на екологічно чисті джерела енергії. Водночас ефективність роботи сонячних панелей суттєво обмежується добовими та сезонними коливаннями сонячної інсоляції, що призводить до недовикористання їх потенціалу.

Одним із перспективних напрямів підвищення ефективності фотоелектричних систем є збільшення інтенсивності сонячного випромінювання, що потрапляє на поверхню панелі. Це може бути досягнуто шляхом застосування додаткових оптичних елементів, зокрема дзеркальних відбивачів. В поєднанні з двохосьовими сонячними трекерами, які забезпечують перпендикулярне падіння сонячних променів на поверхню панелі протягом дня, використання плоских дзеркал дозволяє додатково концентрувати світловий потік.

Метою даного дослідження є теоретичне обґрунтування та експериментальна перевірка підвищення ефективності генерації електроенергії сонячною панеллю шляхом використання плоского дзеркального відбивача з оптимізованими параметрами. Для досягнення поставленої мети проаналізовано існуючі підходи до підвищення ефективності фотоелектричних модулів, обґрунтовано доцільність застосування плоского дзеркала, а також розроблено аналітичну модель визначення оптимального кута його встановлення.

На відміну від більшості відомих досліджень [2, 3], де параметри розташування відбивачів визначаються експериментально, у даній роботі запропоновано аналітичний підхід до визначення оптимального кута між площинами сонячної панелі та дзеркала. Отримана залежність дозволяє визначити такий кут, за якого відбитий світловий потік повністю покриває поверхню панелі, не виходячи за її межі. Це забезпечує максимально ефективне використання додаткового випромінювання. Отримана залежність має наступний вигляд:

$$\gamma = 90 + \arcsin((\sqrt{(b/a)^2 + 8} - b/a)/4),$$

де γ – тупий кут між площинами панелі та дзеркала, град., a – довжина панелі, b – довжина дзеркала.

Аналіз літературних джерел показав, що використання дзеркальних відбивачів у поєднанні з системами стеження за Сонцем може забезпечити суттєве підвищення потужності фотоелектричних установок. Зокрема, в роботі [2] розглянуто систему з дзеркальним підсиленням, однак відсутність чіткого оптичного обґрунтування не дозволяє точно оцінити внесок дзеркала в загальний ефект. В дослідженні [3] експериментально встановлено залежність ефективності від кількості та кута встановлення відбивачів, проте оптимальні параметри визначаються емпірично. Це підтверджує доцільність використання аналітичного підходу, запропонованого в даній роботі. Попередні результати дослідження були частково оприлюднені в [1].

Експериментальна частина дослідження передбачала створення установки з сонячною панеллю та плоским дзеркальним відбивачем. Було проведено серію вимірювань електричних характеристик (напруги, сили струму та потужності) для різних конфігурацій системи: без дзеркала та з використанням відбивачів різної довжини. Дослідження виконувались у денний та вечірній періоди, що дозволило оцінити ефективність системи за різних умов інсоляції.

Отримані результати підтвердили адекватність розробленої аналітичної моделі: розбіжність між теоретично визначеними та експериментально вимірними значеннями оптимального кута була мінімальною (наприклад, для дзеркала довжиною 55 см: 109,2° розрахункових проти 110° дослідних). Встановлено, що використання плоского дзеркального відбивача забезпечує стабільне підвищення потужності сонячної панелі. Максимальний ефект спостерігався при використанні відбивача більшої довжини у вечірній час, коли інтенсивність сонячного випромінювання є нижчою.

Додатково встановлено, що збільшення довжини дзеркального відбивача понад 3–4 довжини сонячної панелі є недоцільним, оскільки приріст додатково захопленого випромінювання стає незначним. Таким чином, оптимізація геометричних параметрів системи є важливим фактором підвищення її ефективності.

Отже, результати проведеного дослідження підтверджують доцільність використання плоских дзеркальних відбивачів у фотоелектричних системах, особливо у поєднанні з двохосовими сонячними трекерами, які дозволяють зберігати геометрію відбиття проміння протягом дня. Запропонований аналітичний підхід дозволяє визначати оптимальні параметри системи та може бути використаний при проєктуванні енергоефективних сонячних установок.

ПОСИЛАННЯ

48. Кондратюк П. Є. Підвищення ефективності генерації електроенергії сонячними панелями на двохосових треках шляхом використання плоских дзеркал. Інтелектуальний ресурс сьогодення: наукові задачі, розвиток та запитання : зб. наук. пр. за матеріалами VI Міжнар. наук. конф. (Черкаси, 27 лютого 2026 р.). Вінниця : ТОВ «УКРЛОГОС Груп», 2026. С. 190–192.
49. Das P., Habib M., Mynuddi M. Microcontroller Based Automatic Solar Tracking System with Mirror Booster. International Journal of Sustainable and Green Energy. 2015. Vol. 4, no. 4. P. 125–136. URL: <https://www.sciencepublishinggroup.com/article/10.11648/j.ijrse.20150404.11> (дата звернення: 15.03.2026).
50. Manosroi W., Prompattra P., Kerngburee P. Performance improvement of two-axis solar tracking system by using flat-mirror reflectors. Energy Reports. 2020. Vol. 6. P. 9–14. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484720313822> (дата звернення: 15.03.2026).

ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА БІОДИЗЕЛЮ З ЗАСТОСУВАННЯМ УЛЬТРАЗВУКУ

Мовчанюк А. В., Семінський Є. О.

*КПІ ім. Ігоря Сікорського,
просп. Берестейський 37, м.Київ,
03056, Україна
тел.: (050) 5874456, e-mail: gidlefanakk09@gmail.com*

Актуальність збільшення обсягів виготовлення більш екологічно чистого палива, а саме біодизелю, дозволить зменшити вплив на пришвидшення глобального потепління та ймовірності паливних криз. Його виробництво можливе усюди з олій різних розповсюджених культур: ріпаку, соняшнику і т. ін., а також, наприклад, мікрородоростей. Дослідження методів виробництва (найпоширенішого каталітичної переетерифікації та новітнього з використанням ультразвуку) та їх особливостей дозволить розширити теоретичну та практичну бази знань у цьому напрямі, що позитивно вплине на прогрес у галузі та дозволить ефективніше виготовляти якісніший продукт та зробити його більш економічно привабливим за рахунок зменшення вартості.

Мета роботи полягає у дослідженні технологій виготовлення біодизелю за допомогою методів з застосуванням ультразвуку, порівнянні їх з методом каталітичної переетерифікації і оцінці властивостей одержаних зразків біодизелю. Досягнення поставленої мети ґрунтується на виконанні завдань: 1) Дослідити методи виготовлення біодизелю; 2) Виготовити зразки палива з використанням різних методів виробництва; 3) Зафіксувати тривалість, енерговитрат кожного етапу виробництва для різних методів; 4) Дослідити деякі фізико-хімічні параметри продуктів, одержаних різними методами виготовлення; 5) Порівняти отримані дані; 6) Узагальнити одержані результати.

Висновки: в результаті проведених досліджень встановлено, що безкаталітичний УЗ-метод є найбільш ефективним та перспективним порівняно з каталітичним УЗ-методом та методом каталітичної переетерифікації з використанням мішалки, оскільки за допомогою першозгаданого ми за 12 хвилин отримуємо продукт з густиною 910 кг/м^3 та в'язкістю $2.188 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ при температурі 8.5°C та $\text{pH}=7$, що повністю відповідає нормам, виготовляється швидше, потребує менше засобів очищення та не потребує використання каталізатору та додавання надлишку спирту, що суттєво здешевшає виробництво.

Ключові слова: біодизель, біопаливо, ультразвук, технології виготовлення, переетерифікація, каталізатор, каталітична переетерифікація, кавітація.

Під час виконання дослідження було проведено 214 експериментів та вимірювання енергоспоживання при виробництві зразків з використанням різних методів, а саме ультразвукової переетерифікації (УЗ-метод) та каталітичної переетерифікації з застосуванням мішалки, а також вимірювання параметрів отриманих зразків: густини, в'язкості та pH. Методика проведення експериментів була розроблена на основі теоретичних та практичних відомостей наведених у джерелах.

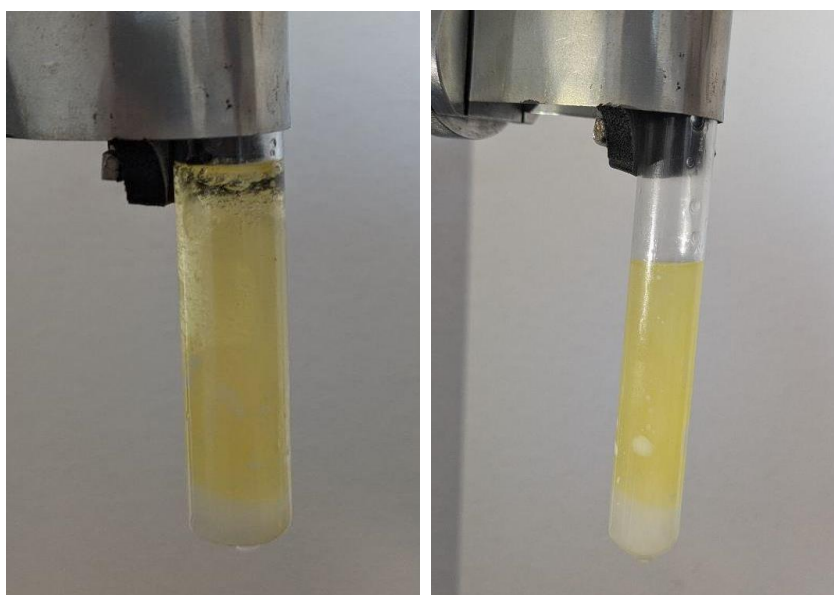
В результаті раніше згаданих експериментів було встановлено, що під дією ультразвукового (УЗ) випромінювання реакція переетерифікації проходить швидше та більш бурхливо, ніж з застосуванням традиційних методів виготовлення, найбільш бурхливо вона протікає першу хвилину, потім йде на спад та завершується при 12 хвилинах обробки (Фото 1, а). При проведенні реакції з використанням УЗ-методу та каталізатору не було помічено значної різниці в бурхливості чи швидкості протікання реакції порівняно з безкаталітичним УЗ-методом, але при додаванні каталізатора під час виготовлення біодизелю на поверхні утворювалась піна, яка містила чітко відокремлені продукти білого та жовтого кольорів, крім піни на поверхні виявлена плівка трохи сіріша за отриманий біодизель. Також варто зазначити, що отримане розділилося на чотири різні фракції (Фото 1, б і 1, в).

Під час проведення експериментів було встановлено, що реакція з використанням УЗ-методу проходить швидше та більш бурхливо під час використання технічної води (Фото 2.б), ніж зі застосуванням дистильованої (Фото 2.а).

В процесі виготовлення зразків за допомогою традиційного методу каталітичної переетерифікації з використанням мішалки реакція протікала повільніше, ніж з застосуванням УЗ-методу. Кінцеві продукти мали суттєві відмінності, а саме: при використанні УЗ-методу каталізатор більше розчинився та отримана речовина розділилася на дві фракції, менш густа з них мала непрозорий гірчичний колір, а друга, більш прозора, мала трохи сіріший колір, ніж перша. При використанні методу з мішалкою каталізатор розчинився гірше та на виході за той самий час не відбулося розділення на фракції. У підсумку, УЗ метод краще інтенсифікує процес розчинення, забезпечує ліпше змішування, значно прискорює швидкість реакції ($\gamma \sim 60$ разів) порівняно з традиційним методом з застосуванням мішалки.



а) б) в)
Фото 1. - Зразки біодизелю (пояснення у тексті)



а) б)

Фото 2. - Зразки біодизелю виготовлені з використанням води різного ступеню чистоти

Встановлено, що не дивлячись на більше енергоспоживання (у ~ 6.5 разів) ультразвукової установки порівняно з мішалкою є більш ефективною оскільки прискорює реакцію у 10 разів. Енергоспоживання мішалок помітно відрізняється навіть на таких маленьких об'ємах, трилопатева мішалка продемонструвала менше споживання порівняно з лопатевою на 0.2 Вт. Також трилопатева мішалка продемонструвала наступні переваги: менші розміри воронки та кращу циркуляцію при перемішуванні.

Вимірювання продемонстрували, що при застосуванні УЗ-методу без додавання каталізатору кінцевий продукт має нейтральний рН середовища (~ 7), а з додаванням - 8, що свідчить про утворення лужного середовища та наявності значної кількості мила.

Густина біодизеля для УЗ-методів виготовлення не відрізняється при додаванні каталізатора та без нього, і в обох випадках при температурі 8.5°C становить 910 кг/м^3 .

На відміну від густини, в'язкість, оцінена за динамічним коефіцієнтом, дещо відрізняється для продуктів, одержаних різними методами - для УЗ-методу із застосуванням каталізатора вона дещо (на $0,205 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) більша.

У підсумку отриманих результатів можна стверджувати, що безкаталітичний УЗ-метод є найбільш ефективним та перспективним порівняно з каталітичним УЗ-методом та методом каталітичної переестерифікації з використанням мішалки, оскільки з його використанням ми отримуємо продукт який повністю відповідає нормам, виготовляється

швидше, потребує менше засобів очищення та не потребує використання каталізатору та додавання надлишку спирту, що суттєво здешевшає виробництво.

Практичне значення проведених досліджень полягає у можливості їх подальшого використання для створення нових, більш ефективних, технологічних ліній виготовлення біопалива, що дозволить покращити його якість та зробити його дешевшим. Особлива увага у роботі приділена методу виробництва з використанням ультразвуку, дослідженню деяких фізико-хімічних показників продукту та особливостей виробництва, тож отримані дані можуть використовуватися і для вдосконалення вже існуючих ліній виробництва.

ПОСИЛАННЯ

1. Гончаренко С. Нечутні звуки–трударі. Київ : Техніка, 1987. 190 с.
2. Дубровін В., Голуб Г., Поліщук В. Біодизель та біоетанол. Київ : ЮНІДО, 2015. 52 с.
3. Колосов О. Високоєфективні засоби приготування біопалива. Київ : Січка, 2010. 152 с.
4. Луговський О.Ф. та ін. Ультразвукові кавітаційні технології. Знезараження та фільтрування. Вінниця : Вид. ФОП Кушнір Ю.В., 2022. 268 с.
5. Стороженко В., Смирнов В. Реактори об'ємного типу з перемішувальними пристроями (розрахунок та конструювання): навчальний посібник. Суми : Сум. держ. ун-т, 2010. 283 с.
6. Сухенко Ю., та ін. Технологічні особливості виготовлення біодизельного пального з рослинних олій. Харчова промисловість. 2008. № 6. С. 34–37.
7. Karim Z. A. A. The characteristics of water-in-biodiesel emulsions produced using ultrasonic homogenizer. Alexandria Engineering Journal. 2020. No. 59. P. 227–237.
8. Knothe G. Analyzing biodiesel: standards and other methods. Journal of the American Oil Chemists' Society. 2006. Vol. 83, no.10 . P. 823–833.
9. Ma F., Hanna M. A. Biodiesel production: a review. Bioresource Technology. 1999. Vol. 70, no. 1. P. 1–15.
10. Marchetti J. M., Miguel V. U., Errazu A. F. Possible methods for biodiesel production. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2007. Vol. 11, no. 6. P. 1300–1311.
11. Sartomo A., Santoso B. Recent progress on mixing technology for water-emulsion fuel: A review. Energy Conversion and Management. 2020. No. 213.
12. S. Pandey et al. Biodiesel production from microalgae: A comprehensive review on influential factors, transesterification processes, and challenges Fuel. 2024. No. 367.

УДК

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ЛЮДСЬКОГО ВОЛОССЯ ЯК ЕКОЛОГІЧНОГО БІОСОРБЕНТУ ДЛЯ РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ

А. О. Олійник

Хмельницький ліцей Хмельницької обласної ради,

вул. Озерна, 14, м. Хмельницький, 29015, Україна

тел.: (067) 340 8556, e-mail: anna.oliynyk1905@gmail.com

Наукові керівники: Білецька Г. А., доктор педагогічних наук, професор ХНУ;

Закалюкіна І. Ю, вчитель біології Хмельницького ліцею

При розв'язуванні поставлених у роботі задач загальні методи теоретичного аналізу проблеми на основі вивчення фізико-хімічних властивостей біосорбентів, зокрема людського волосся, а також експериментальні методи дослідження з використанням цифрової лабораторії та спектрофотометрії. Проведено оцінку ефективності очищення води від іонів важких металів та нафтопродуктів. Встановлено, що людське волосся проявляє сорбційні властивості та може бути використане як доступний і економічно доцільний матеріал.

Ключові слова: біосорбція, очищення води, волосся, важкі метали, нафтопродукти, ресурсозбереження.

Сучасні екологічні виклики, зокрема забруднення водних ресурсів, потребують впровадження ефективних і доступних технологій водоочищення. Традиційні методи часто є енергозатратними та економічно дорогими, такі фактори часто обмежують широке застосування. У цьому контексті актуальним є використання природних біосорбентів, зокрема відходів біологічного походження.

Метою дослідження є визначення ефективності людського волосся як фільтрувального матеріалу для очищення води від різних типів забруднень.

Об'єкт дослідження - людське волосся як природний сорбент.

Предмет дослідження- процес вилучення іонів важких металів і нафтопродуктів із водного середовища.

Експериментальні дослідження проводили із використанням модельних розчинів солей важких металів: купрум (II) сульфат, ферум (III) хлорид, нікель (II) сульфат і водно-олійну емульсію. Очищення здійснювали шляхом фільтрації через шар підготовленого волосся. Оцінку ефективності проводили за показниками рН (як індикатор взаємодії функціональних груп з металами) та за оптичною густиною розчинів до та після фільтрації.

Результати дослідження показали, що використання волосся як фільтрувального матеріалу сприяє підвищенню рівня кислотності розчинів, зменшенню каламутності та частковому зниженню концентрації іонів важких металів. Результати коливаються від 39 % для ферум (III) хлориду та 1.7 % 3.7 % для купруму та нікелю відповідно. Водно-олійна емульсія очищалась повністю.

Отримані результати свідчать про наявність сорбційних властивостей людського волосся, що зумовлено вмістом кератину та функціональних груп, які здатні до іонного обміну та адсорбції. Використання волосся як біосорбенту дозволяє зменшити витрати на очищення води та сприяє повторному використанню біологічних відходів.

Таким чином, застосування людського волосся у системах водоочищення є перспективним напрямком розвитку ресурсозберігаючих та енергоефективних технологій, що відповідають принципам сталого розвитку.

УДК 621.311.25

ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ПОТОКІВ ПОВІТРЯ ВІД ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

А. В. Пеньковий

*Кам'янець-Подільський ліцей № 15 Кам'янець-Подільської міської ради Хмельницької області,
пр. Грушевського, 17, м. Кам'янець-Подільський, 32300, Україна,
тел.: (050) 784-50-51, e-mail: pav7845051@gmail.com*

При розв'язуванні поставлених у роботі задач використовувались тематичне дослідження, аналіз науково-теоретичних джерел, фізичний експеримент.

Ключові слова: вітроенергоустановка з вертикальною віссю, коефіцієнт використання енергії вітру, швидкість вітру, енергія потоків повітря від транспортних засобів, виробництво електроенергії.

USING AIR FLOW ENERGY FROM VEHICLES

A. V. Penkovyi

*Kamianets-Podilskyi Lyceum № 15 of the Kamianets-Podilskyi City Council of Khmelnytskyi Oblast,
17 Hrushevsky Ave., Kamianets-Podilskyi, 32300, Ukraine,
phone: (050) 784-50-51, e-mail: pav7845051@gmail.com*

When solving the tasks set in the work, thematic research, analysis of scientific and theoretical sources, and physical experiment were used.

Key words: vertical axis wind turbine, power coefficient, wind speed, air flow energy from vehicles, electricity production.

ORCID: 0000-0000-0000-0000.

Впровадження відновлюваних джерел енергії є одним з найбільш актуальних питань для України особливо зараз, коли зазнають руйнувань об'єкти енергетичної інфраструктури. Метою роботи є вивчення питання використання енергії потоків повітря від транспортних засобів для освітлення автомобільних доріг [1-2] і роботи світлофорів, що зменшить кількість ДТП, а також для забезпечення частково електроенергією об'єктів критичної інфраструктури під час відключень і блекаутів.

Експериментально досліджено швидкості потоків від автотранспорту за містом та в межах міста. Вітроенергоустановки з вертикальною віссю не залежать від напрямку швидкості потоків повітря, тому підходять в якості альтернативного джерела енергії для освітлення автомобільних доріг. Тому запропоновано їх встановлювати на розділових смугах жвавих автотрас за межами населених пунктів, де вони будуть мати умови для стабільної роботи. В містії завдяки малим швидкостям потоків від автомобілей та з точки зору безпеки біля доріг вітроенергоустановки використовувати не доцільно.

Вибрано геометричні параметри роторів вітроенергоустановок з вертикальною віссю [3] та їх кількість виходячи з потреб в електроенергії для освітлення автомобільних доріг за межами міста та в місті, а також для роботи світлофорів. Оцінено вітровий потенціал від потоків повітря від транспортних засобів. Коефіцієнт використання потужності вітроенергоустановок із запропонованими геометричними характеристиками при роботі від потоків від транспортних засобів за межами міста складає від 48,9 % до 92,8%, що свідчить про доцільність їх експлуатації на автомобільних дорогах з великим трафіком.

ПОСИЛАННЯ

1. URL: <https://enlilwind.com/> (дата звернення 26.12.2025).
2. ДБН В.2.5-28:2018 Природне і штучне освітлення. – Київ : Міністерство розвитку громад та територій України. 2025. 112 р. URL: <https://e-construction.gov.ua/files-token/a0b8fa760a482b589c6ca4b4c7e6319f> (дата звернення 26.12.2025).
51. Головка В. М. Вітроенергетика: навч. посіб. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 88 с. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/806fc8d2-67c2-43b0-879a-6720501e1b10/download> (дата звернення 26.12.2025).

УДК

ВІТРИЛА З СОНЯЧНИМИ ПАНЕЛЯМИ

А. Д. А. Сарибога

*Політехнічний ліцей НТУУ "КПІ" м. Києва
тел.: +380689297381, e-mail: dariasariboga@gmail.com*

Ключові слова: сонячні панелі, вітрила, зелена енергія.

SAILS WITH SOLAR PANELS

A. D. A. Saryboga

*Polytechnic Lyceum of NTUU "KPI" in Kyiv
tel.: +380689297381, e-mail: vladga2011@gmail.com*

Keywords: solar panels, sails, green energy.

Актуальність дослідження: На сьогодні, однією з найголовніших проблем людства є кількість викидів у атмосферу. Потреба у зменшенні цієї кількості зростає з кожним роком. Морський транспорт має великий вплив на усьо екологію Землі, саме тому поширення зеленої енергії у цю сферу транспорту є актуальним.

Метою роботи є дослідити ефективність вітрил із вбудованими сонячними панелями, які мали б вигляд звичайних та могли б складатися як звичайні.

Об'єкт: вітрильні човни та можливість використання на них сонячних панелей.

Задачі, що були поставлені:

1. дослідити поняття відновлювальних джерел енергії та принцип їхньої роботи;
2. дослідити можливість використання сонячних панелей у сфері морського транспорту;
3. визначити чим вітрила з сонячними панелями, які могли б складатися вертикально, були б кращі за існуючі моделі;
4. порівняти наш спосіб з уже існуючими;
5. показати, на скільки екологічнішим та фінансово вигіднішим є наш проєкт.

Результати роботи:

- Використовуючи вітрила з сонячними панелями, які знаходяться з обох сторін, швидкість може збільшитися на 2%
- Вітрила з сонячними панелями у темний період доби можна використовувати з допомогою сили вітру.
- Водночас вітрила з сонячними панелями, які можуть складатися, є ефективною технологією під час штор-мів та ураганів.
- Вітрила з сонячними панелями, які водночас можуть функціонувати як звичайні, допомагаючи кораблю рухатися з силою вітру, більш екологічними та набагато дешевшим способом пересування для морського транспорту.

Практичне значення роботи: можливість застосування вітрил із вбудованими сонячними панелями, що складаються, посприяє підвищенню енергоавтономності морських суден. Запропонована технологія дозволяє зменшити споживання палива та негативний вплив на довкілля. Матеріали роботи можуть бути використані в навчальних цілях і слугувати основою для подальших інженерних розробок.

ПОСИЛАННЯ

1. Fuel charges in international aviation and shipping: How high; how; and why? <https://web.archive.org/web/20210111000302/https://blogs.worldbank.org/developmenttalk/fuel-charges-in-international-aviation-and-shipping-how-high-how-and-why> (дата звернення 10.11.25)
2. ЕХНОЛОГІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ВИДІВ ПАЛИВА ДЛЯ МОРСЬКИХ СУДЕН. <https://archive.journal-grail.science/index.php/2710-3056/article/view/1023> (дата звернення 10.11.25)
3. ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ ЯК АЛЬТЕРНАТИВА В ЕНЕРГЕТИЦІ <https://ekotechnik.in.ua/blog/vulichne-osvitlennya-na-sonyachnih-batareyah-vidi-perevagi-ta-nedoliki> (дата звернення 11.11.25)
4. Що таке сонячні панелі та як вони працюють? <https://e-si.energy/blog/what-is-a-solar-panel> (дата звернення 11.11.25)
5. Як працює вітрило на яхті: класичне та сучасне пояснення. <https://navi.training/ua/blog/kak-rabotaet-parus-na-yahte-klassicheskoe-i-sovremennoe-ob-yasnenie> (дата звернення 11.11.25)
6. Heavy Weather Dynamics: Upwind Sailing, Windage and Resistance <https://nordkyndesign.com/heavy-weather-dynamics-upwind-sailing-windage-and-resistance/> (дата звернення 11.11.25)
7. How much does it cost to install solar panels on a boat? <https://nenpower.com/blog/how-much-does-it-cost-to-install-solar-panels-on-a-boat/> (дата звернення 11.11.25)

МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕПЛА ЛЮДСЬКОГО ТІЛА ДЛЯ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

О. Т. Цариняк¹, Г. Я. Гургула^{1,2}

¹Коломийський ліцей №9 Коломийської міської ради
вул. Драгоманова, 1, м. Коломия, Івано-Франківська обл., Україна
тел.: +380975278272, e-mail: tsaryniak.oleh@pml.if.ua

²Івано-Франківське обласне відділення Малої академії наук України
вул. Шевченка, 79, м. Івано-Франківськ, Україна
тел.: +380976032906, e-mail: babushchak.h@gmail.com

У роботі досліджено можливості використання тепла людського тіла як джерела низькопотенційної енергії для генерації електроенергії за допомогою термоелектричних перетворювачів. Проаналізовано вплив температурного градієнта, теплового опору системи та умов експлуатації на ефективність генерації. Проведено експериментальні дослідження та обґрунтовано конфігурацію автономної системи живлення для малопотужних пристроїв.

Ключові слова: термоелектричний ефект, ефект Зеебека, термоелектричний генератор, енергоефективність, відновлювана енергетика, носимі пристрої.

POSSIBILITIES OF USING HUMAN BODY HEAT FOR ELECTRICITY GENERATION

O. T. Tsaryniak¹, H. Ya. Hurhula^{1, 2}

¹Kolomyia Lyceum No. 9 of the Kolomyia City Council
1 Drahomanova St., Kolomyia, Ivano-Frankivsk region, Ukraine
phone: +380975278272, e-mail: tsaryniak.oleh@pml.if.ua

²Ivano-Frankivsk Regional Department of the Junior Academy of Sciences of Ukraine
79 Shevchenka St., Ivano-Frankivsk, Ukraine
phone: +380976032906, e-mail: babushchak.h@gmail.com

The paper investigates the possibilities of using human body heat as a source of low-potential energy for electricity generation by means of thermoelectric converters. The influence of the temperature gradient, thermal resistance of the system, and operating conditions on generation efficiency is analyzed. Experimental studies were carried out and the configuration of an autonomous power supply system for low-power devices was substantiated.

Key words: thermoelectric effect, Seebeck effect, thermoelectric generator, energy efficiency, renewable energy, wearable devices.

Сучасні технології автономного живлення потребують нових підходів до використання низькопотенційних джерел енергії, зокрема тепла людського тіла [1]. Особливого значення це набуває в умовах обмеженого доступу до електромереж.

У роботі досліджено процес генерації електроенергії за допомогою термоелектричного модуля TEC1-12706, що працює на основі ефекту Зеебека [2]. Встановлено, що при лабораторному температурному градієнті $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ вихідна напруга досягає 89 мВ. Однак у реальних умовах контакту з тілом людини ефективний температурний перепад зменшується до $2\text{--}4^\circ\text{C}$, що зумовлює зниження напруги до 10–30 мВ.

Експериментально показано суттєву залежність генерації від локалізації модуля: максимальні значення отримано на ділянці чола (до 28,6 мВ після фізичного навантаження), мінімальні — на плечі ($\approx 9,4$ мВ). Максимальна потужність становить до 29,3 мВт. Встановлено, що після 5–10 хв роботи відбувається зменшення напруги внаслідок вирівнювання температур через нагрівання холодної сторони модуля.

Показано, що ключовим обмежувальним фактором є високий сумарний тепловий опір системи «шкіра – модуль – навколишнє середовище», внаслідок чого лише 15–25 % температурного перепаду реалізується на термоелементі [3].

Наукова новизна роботи полягає в експериментальному дослідженні термоелектричної генерації в натільних умовах при надмалих температурних градієнтах (2–4 °C) та встановленні впливу фізіологічних і теплотехнічних чинників на ефективність процесу.

Обґрунтовано архітектуру автономного джерела живлення, що включає термоелектричний генератор, підвищувальний перетворювач та накопичувач енергії. Показано, що застосування суперконденсатора дозволяє реалізувати імпульсний режим живлення та забезпечити роботу малопотужних сенсорів.

Отримані результати підтверджують перспективність використання тепла людського тіла як додаткового джерела енергії для носимих електронних систем в умовах обмеженого енергозабезпечення.

ПОСИЛАННЯ

1. Gobpant J., Nguyen V. T., Lee J. Flexible thermoelectric generator with radiative cooling for body-heat-driven sensing system // *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2025.
2. Leonov V. Thermoelectric energy harvesting of human body heat for wearable sensors // *IEEE Sensors Journal*. 2013.
3. Tabaie Z., Omidvar A. Human body heat-driven thermoelectric generators as a sustainable power supply for wearable electronic devices // *Heliyon*. 2023.

УДК

ВПЛИВ КУТА НАХИЛУ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ЇХ РОБОТИ В УМОВАХ РІЗНОГО СОНЯЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Д. М. Вагабова

*Коцюбинський ліцей №1 Коцюбинської селищної ради Бучанського району Київської області, вул. Пономарьова 6/4, смт. Коцюбинське, Бучанський район, Київська обл., 08298
тел. (068) 847 0442, e-mail: vagabovadasha@gmail.com*

Досліджено вплив кута нахилу сонячних панелей на ефективність виробництва електроенергії з урахуванням просторових відмінностей сонячного навантаження. Проведено аналітично-розрахункове моделювання для п'яти міст Європи (Київ, Львів, Херсон, Берлін, Рим). Встановлено кількісне співвідношення впливу інсоляції та кута нахилу на обсяг генерації електроенергії, а також визначено коефіцієнт використання встановленої потужності як інтегральний показник ефективності.

Ключові слова: сонячна енергетика, інсоляція, кут нахилу, ефективність, коефіцієнт використання потужності, енергетичні втрати.

У сучасних умовах глобальної енергетичної трансформації та декарбонізації економіки підвищення ефективності використання відновлюваних джерел енергії є одним із ключових завдань енергетичної науки. Сонячна енергетика характеризується значною залежністю від природно-кліматичних умов, що зумовлює необхідність оптимізації параметрів встановлення фотоелектричних систем.

Сонячне навантаження (інсоляція) визначається як сумарна енергія сонячного випромінювання, що надходить на одиницю площі за певний період часу, і є базовим фактором формування енергетичного потенціалу території [3; 4]. Просторові відмінності інсоляції зумовлені географічною широтою, тривалістю світлового дня, прозорістю атмосфери, хмарністю та сезонними змінами висоти Сонця над горизонтом.

Поглинання сонячного випромінювання поверхнею панелі підпорядковується косинусному закону:

$$I = I_0 \cdot \cos(\theta),$$

де I_0 — інтенсивність випромінювання при перпендикулярному падінні променів, θ — кут між напрямком сонячних променів і нормаллю до поверхні панелі [1]. Максимальне значення енергії досягається за умови мінімізації цього кута, що визначає необхідність оптимального нахилу панелей.

Оптимальний кут нахилу (β_{opt}) у першому наближенні відповідає географічній широті місцевості (ϕ), тобто:

$$\beta_{opt} \approx \phi,$$

що забезпечує середньорічне максимальне поглинання сонячної енергії [6]. Однак більш точні моделі враховують сезонні коливання сонячної висоти, орбітальні параметри Землі та дифузну складову випромінювання, що призводить до незначних відхилень від цього співвідношення.

Річне виробництво електроенергії фотоелектричною системою визначається за формулою:

$$E = P \cdot H \cdot \eta,$$

де P — встановлена потужність (1 кВт), H — річна інсоляція (кВт·год/м²), η — коефіцієнт корисної дії системи (0,20) [2; 3]. З урахуванням системних втрат (інверторні, температурні, кабельні, пилове забруднення), які прийнято на рівні 25%, фактичне виробництво становить:

$$E_{eff} = E \cdot (1 - 0,25).$$

Практичні розрахунки виконано для п'яти міст, що репрезентують різні широтні зони Європи. Вибір Києва, Львова та Херсона дозволяє охарактеризувати територіальну диференціацію в межах України, тоді як Берлін і Рим відображають контраст між помірною та субтропічною кліматичними зонами.

Отримані результати показали, що річне виробництво електроенергії без урахування втрат становить відповідно 240, 230, 260, 200 та 300 кВт·год, а з урахуванням втрат — 180, 172,5, 195, 150 та 225 кВт·год. Спостерігається чітка залежність між широтою місцевості та рівнем генерації: зменшення широти супроводжується зростанням інсоляції та відповідно збільшенням виробництва електроенергії.

Для узагальнення результатів використано коефіцієнт використання встановленої потужності (CF), який визначається як:

$$CF = E_{eff} / (P \cdot 8760).$$

Цей показник дозволяє оцінити ефективність роботи системи незалежно від її номінальної потужності та є універсальним критерієм у енергетичних дослідженнях [2; 7; 8]. Для досліджуваних міст значення CF знаходяться в межах 0,017–0,026, що відповідає типовим показникам для сонячної енергетики в Європі.

Аналіз впливу кута нахилу показав, що відхилення від оптимального значення на 10–20° призводить до зменшення річного виробництва лише на 2–6%. Це пояснюється тим, що протягом року Сонце змінює свою висоту над горизонтом, і навіть неоптимально встановлена панель частково компенсує втрати за рахунок сезонних змін кута падіння випромінювання.

Додатково встановлено, що зі збільшенням географічної широти оптимальний кут нахилу зростає, що пов'язано зі зменшенням середньорічної висоти Сонця над горизонтом. У південних регіонах (Рим, Херсон) Сонце перебуває вище, тому панелі встановлюються під меншим кутом, тоді як у північних широтах (Берлін, Львів) кут нахилу є більшим.

Отримані результати свідчать, що визначальним фактором ефективності сонячних електростанцій є рівень сонячного навантаження, тоді як оптимізація кута нахилу забезпечує додаткове підвищення ефективності в обмежених межах. Це дозволяє сформулювати практичну рекомендацію: при проектуванні сонячних систем першочергову увагу слід приділяти географічному розташуванню, а коригування кута нахилу використовувати як інструмент точного налаштування.

Наукова новизна полягає у поєднанні розрахунків річної генерації, аналізу інсоляції та використання коефіцієнта CF для кількісного порівняння впливу різних факторів у межах єдиної моделі.

Практичне значення роботи полягає у можливості застосування отриманих залежностей при проектуванні побутових та малих сонячних електростанцій, а також у навчальному процесі для ілюстрації впливу географічних і технічних параметрів на ефективність енергетичних систем.

ПОСИЛАННЯ

1. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar Engineering of Thermal Processes. – 4th ed. – Hoboken : John Wiley & Sons, 2013. – 910 p.
2. International Energy Agency (IEA). Solar PV [Електронний ресурс]. URL: <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/solar> (дата звернення: 19.03.2026).
3. National Renewable Energy Laboratory (NREL). Solar Resource Data [Електронний ресурс]. URL: <https://www.nrel.gov/solar/> (дата звернення: 20.03.2026).
4. NASA. Surface Meteorology and Solar Energy Data Set [Електронний ресурс]. URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата звернення: 23.03.2026).
5. Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS) / European Commission, Joint Research Centre [Електронний ресурс]. URL: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ (дата звернення: 23.03.2026).
6. Solarpath. Кут нахилу сонячних панелей [Електронний ресурс]. URL: <https://solarpath.com.ua/blog/kut-nahilu-sonyachnih-panelei/> (дата звернення: 22.03.2026).
7. U.S. Energy Information Administration (EIA). Capacity factor explained [Електронний ресурс]. URL: <https://www.eia.gov/> (дата звернення: 25.03.2026).

Наукове видання

**МАТЕРІАЛИ ХХVІІ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ
КОНФЕРЕНЦІЇ**

**ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА ТА
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ХХІ СТОЛІТТІ
20–22 травня 2026 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., Яценко Л. В.

Редакційна група:

Суховерков О. В., Недзельська О. М.,
Єзерницька С. Г., Кушнеренко О. В.

Комп'ютерна верстка та дизайн обкладинки:

Суховерков О. В.

Публікується у вигляді електронного видання.

Підписано до публікації 12.05.2026

Протокол №10 від 12.05.2026