

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **ХОМУТОВА Сергія Володимировича**
на тему **«Багаторівневе адаптивне керування режимами роботи
локальних комбінованих систем електрозабезпечення з відновлюваними
джерелами та установками зберігання електроенергії»**,

представлену на здобуття ступеня доктора філософії в галузі знань

14 – Електрична інженерія за спеціальністю

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність теми дисертації

Сучасний розвиток електроенергетики демонструє зростання частки відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), перехід до децентралізації та розподіленої генерації, загальну концепцію переход до низьковуглецевих енергетичних систем. Особливої актуальності набувають локальні комбіновані системи електрозабезпечення, що поєднують сонячні та вітрові електростанції, системи зберігання енергії, інверторні перетворювачі та інтелектуальні засоби керування. Актуальність тематики дисертаційного дослідження впливає з потреб забезпечення динамічної стійкості, надійності та енергоефективності таких систем в умовах нестабільного забезпечення електроенергією, інерційного дефіциту та стохастичності відновлюваних джерел енергії. Локалізовані комбіновані системи з використанням відновлюваної генерації відзначаються рядом переваг - автономністю електропостачання, зниженням шкідливих викидів та економічною складовою. Однак їх ефективне використання потребує нових методів, моделей та алгоритмів багаторівневого керування режимами роботи, які враховували б безінерційні інверторні засоби постачання енергії та використання засобів збереження енергії.

В Україні актуальність даної проблематики загострена особливими обставинами – дефіцитом паливних ресурсів, наслідками воєнних дій та перебудовою підходів до виробництва, розподілу і споживання енергії.

Дисертаційна робота присвячена розробленню та дослідженню методів багаторівневого адаптивного керування локальними комбінованими системами електрозабезпечення (ЛКСЕ) на основі відновлюваних джерел енергії та систем зберігання енергії, для забезпечення їх стійкості, енергоефективності та надійності роботи. На основі проведених досліджень було вирішено актуальну науково-технічну задачу – підвищення динамічної стійкості, надійності та енергоефективності ЛКСЕ в умовах інерційного дефіциту та стохастичності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Об'єктом дослідження є процеси перетворення, балансування та керування потоками енергії з ВДЕ та установками зберігання електроенергії (УЗЕ). Метою дослідження визначено забезпечення стабільності параметрів частоти й напруги при зміні режимів

роботи, шляхом розроблення методів адаптивного керування параметрами інверторів та участю накопичувачів енергії у балансуванні потужності.

Дослідження за темою дисертаційної роботи Хомутова С.В. проводилися згідно з планами наукової діяльності Інституту відновлюваної енергетики НАН України, затвердженими постановами бюро Відділення енергетики та енергетичних технологій НАН України: науково-дослідними роботами «Комплекс-3» (ДР №0118U003385) та «Комплекс-Інтегро» (ДР №0123U100782).

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Дисертаційна робота присвячена дослідженню методів, моделей та алгоритмів багаторівневого керування режимами роботи комбінованих локальних електроенергетичних систем з інверторними джерелами генерації та установками зберігання електроенергії.

Основні положення дисертації, висновки і рекомендації досить обґрунтовані. У дослідженні застосовано широкий комплекс математичних, статистичних та спеціалізованих методів дослідження: системного аналізу, теорії електроенергетичних систем, математичного моделювання (методів створення цифрового двійника), теорії автоматичного керування, методів статистичного аналізу та теорії ймовірностей, цифрового спектрального аналізу.

Для реалізації моделей та проведення обчислювальних експериментів використано програмні середовища MATLAB/Simulink, ETAP та засоби цифрового моделювання енергетичних систем. Вплив ВДЕ та УЗЕ на параметри електроенергії в електричній мережі показано на практичному прикладі, результати розрахунків підтвердились комп'ютерним моделюванням.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими і апробованими на міжнародних наукових конференціях.

Наукова новизна отриманих результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

- вперше розроблено багаторівневий адаптивний підхід до керування локальними комбінованими системами електрозабезпечення, який, на відміну від існуючих, враховує динамічну зміну режимів роботи інверторів залежно від поточного стану, параметрів зовнішньої мережі та критеріїв оптимальності. Запропонований метод забезпечує адаптивну зміну параметрів регуляторів та структури керування в режимі реального часу, що підвищує стійкість ЛКСЕ в умовах стохастичної зміни генерації та режимів роботи;

- вдосконалено математичні моделі режимів ЛКСЕ шляхом введення до структури моделі технологічних конфліктів, що дозволило формалізувати

взаємозалежність між рівнем надійності, частотою залучення УЗЕ до стабілізації та швидкістю деградації УЗЕ, а також створити основу для постановки багатокритеріальної задачі оптимального вибору режимів роботи ЛКС;

- вдосконалено метод оцінювання динамічної стійкості локальних комбінованих систем шляхом інтеграції додаткових показників у єдину систему критеріїв оцінювання, що забезпечує можливість кількісного оцінювання компромісу між динамічною стійкістю та довговічністю;

- дістали подальший розвиток методи побудови цифрових двійників та алгоритмів адаптивного керування в єдиному цифровому середовищі, та методи адаптивного вибору режимів роботи ЛКСЕ на основі тривимірних карт адаптивності (карт режимів). Це забезпечує можливість автоматизованого визначення оптимального режиму керування залежно від поточного стану ЛКСЕ та прогнозованих сценаріїв роботи.

Можна зазначити, що в дисертаційній роботі Хомутова С.В. поставлене наукове завдання виконано, а здобувач оволодів методологією наукових досліджень.

Результати дисертаційного дослідження мають **практичну цінність** та можуть бути безпосередньо використані в різних сферах енергетики України. Практичне значення полягає в тому, що розроблені методи, моделі та алгоритми можуть бути використані при проектуванні та експлуатації локальних комбінованих систем електрозабезпечення для критичної інфраструктури, телекомунікаційних центрів, дата-центрів, промислових об'єктів та систем виробництва водню.

Результати дослідження дозволяють:

- підвищити динамічну стійкість ЛКСЕ в умовах високої частки ВДЕ;
- зменшити деградацію систем зберігання енергії;
- скоротити втрати електроенергії та підвищити загальний ККД системи;
- забезпечити переходи між режимами мережі, острову та ресинхронізації;
- підвищити рівень кіберзахищеності та сумісності систем SCADA/EMS.

Практичне значення результатів підтверджено розробленням рекомендацій для об'єктів, де інтелектуальні системи керування забезпечують живлення телекомунікаційних вузлів та дата-центрів. Розраховано економічний ефект від впровадження адаптивного алгоритму. Отримані кількісні оцінки стійкості можуть бути використані при плануванні автономних мікромереж та інтеграції великої частки ВДЕ у слабкі вузли енергосистеми.

Практична значимість підтверджена 4-ма актами впровадження від наукових та виробничих установ, наведеними в додатку.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача Сергія Хомутова повністю відповідає Стандарту вищої освіти зі спеціальності 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка відповідно освітньої програми ІВЕ НАН України.

Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку джерел і додатку. Основний зміст викладений на 171 сторінці друкованого тексту, загальний обсяг дисертації 205 сторінок, що містять 22 рисунків, 20 таблиць. Список використаної літератури налічує 76 найменувань.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету та основні завдання дослідження, зв'язок з науковими програмами, вказано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У *першому розділі* виконано аналіз сучасних тенденцій розвитку локалізованих комбінованих систем на основі ВДЕ. Розглянуто особливості функціонування інверторно-орієнтованих енергетичних систем, проаналізовано алгоритми керування інверторними ресурсами, формалізовано технологічні конфлікти, обґрунтовано задачі дослідження.

У *другому розділі* розроблено математичні моделі та методи адаптивного керування локалізованими комбінованими системами електропостачання (ЛКСЕ). Сформовано багаторівневу структуру керування, запропоновано інтегральний критерій адаптивності та метод побудови карт режимів. Обґрунтовано використання стохастичної оптимізації та цифрових двійників.

У *третьому розділі* розроблено цифровий двійник ЛКСЕ та алгоритми адаптивного керування режимами роботи інверторно-орієнтованих енергетичних систем. Досліджено вплив параметрів керування на стійкість системи, сформовано методи інтеграції цифрового двійника з SCADA/EMS-системами на основі стандартів CIM та IEC/TS 62351.

У *четвертому розділі* проведено моделювання, аналіз та оцінювання практичних режимів роботи комбінованої системи електропостачання. Сформовано сценарії роботи, виконано моделювання перехідних процесів, проведено аналіз ресурсних характеристик та оцінено вплив різних алгоритмів керування на динамічну стійкість системи. Виконано порівняння режимів роботи системи за критеріями надійності, енергоефективності та деградації УЗЕ, сформовано практичні рекомендації щодо запропонованих методів керування.

У *висновках* наведено основні результати дисертаційного дослідження, визначено перспективні напрями подальших досліджень у сфері адаптивного керування локалізованими комбінованими системами.

Дисертаційна робота є завершеною науковою працею і свідчить про наявність особистого внеску здобувача у науковій галузі електричної інженерії. Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням.

Робота оформлена відповідно до вимог наказу МОН України від 12 січня 2017 р. № 40 «Про затвердження вимог до оформлення дисертації».

Розглянувши звіт подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадиння, можна зробити висновок, що дисертаційна робота Хомутова С.В. є результатом самостійних досліджень здобувача і не містить елементів фальсифікації, компіляції, фабрикації, плагіату та запозичень. Використані ідеї, результати і тексти інших авторів мають належні посилання на відповідне джерело.

Порушення принципів академічної доброчесності не виявлено.

Дисертаційна робота написана українською мовою. Етапи дослідження, виконані відповідно до загальної тематики роботи, є логічними та викладені в зрозумілій та доступній формі. Текст роботи викладено науковим стилем мовлення, технічно грамотно, і використана переважно загальноприйнята термінологія. Для іншомовних термінів, які не мають усталених відповідників, додано оригінальні назви.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

За результатами досліджень, для висвітлення та апробації наукових результатів, зазначених в дисертації, було зроблено 9 наукових публікацій, у тому числі: 4 статті у наукових фахових виданнях України, що включені до списку ДАК України та проіндексовані в базі даних Scopus; 5 доповідей та тез на фахових наукових конференціях.

Аналіз цієї публікаційної бази засвідчує, що здобувач повною мірою відобразив основні положення та результати свого дисертаційного дослідження, забезпечивши їх наукову апробацію на належному рівні.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Зауваження рецензента стосуються головним чином якості подання матеріалу.

1. Застосовано загалом виважену термінологію, однак присутня значна кількість скорочень та аббревіатур, спеціальних позначень, що створює певні труднощі при читанні.

2. Незважаючи на досягнуті наукові та практичні результати, слід зазначити низку обмежень, які визначають межі застосовності запропонованих рішень. Це обмеженість конфігурації системи, стохастичних моделей роботи ВДЕ, лінійних моделей деградації, тощо. Автор вказує на обмеженість запропонованих підходів та пропонує шляхи подальшого вдосконалення.

3. Викладення матеріалу загалом чітке та стилістично виважене, проте присутня певна кількість орфографічних та лексичних помилок, пунктуації. В даному випадку це не вплинуло на розуміння тексту.

4. На деяких рисунках (наприклад 3.2) низька чіткість шрифту.

5. У змісті не вказано сторінку списку використаних джерел, хоча сам список наявний.

Вважаю, що висловлені зауваження не є визначальними, не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість отриманих результатів і не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновок про дисертаційну роботу

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Хомутова Сергія Володимировича на тему «Багаторівневе адаптивне керування режимами роботи локальних комбінованих систем електрозабезпечення з відновлюваними джерелами та установками зберігання електроенергії» виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність отриманих теоретичних і практичних результатів якого спрямована на розв'язання актуального наукового завдання, що має істотне значення для галузі електричної інженерії загалом та відновлюваної енергетики зокрема.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в пп. 6-9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44.

Здобувач Хомутов Сергій Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 – Електрична інженерія за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний рецензент:

Старший науковий співробітник
Інституту відновлюваної енергетики
НАН України,
кандидат технічних наук

Володимир КОХАНЄВИЧ

«26» серпня 2026 р.



Підпис Коханевича В.В.
завідую.

Завідуюч відділу кадрів



В.В. Горинько