

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

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі – підвищенню динамічної стійкості, надійності та енергоефективності локальних комбінованих систем електрозабезпечення (ЛКСЕ) в умовах інерційного дефіциту та стохастичності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Об'єктом дослідження є процеси перетворення, балансування та керування потоками енергії у ЛКСЕ з ВДЕ та установками зберігання електроенергії. Актуальність тематики дисертаційного дослідження впливає з потреб забезпечення динамічної стійкості, надійності та енергоефективності таких систем в умовах нестабільного забезпечення електроенергією, характерного для сучасної вітчизняної енергетики. Іншим фактором актуальності є увага автора до розподіленої генерації з використанням відновлюваної енергетики, включно з оцінкою економічної складової. Вирішення цієї важливої задачі потребує нових методів, моделей та алгоритмів керування режимами роботи, які враховували б особливості безінерційних інверторних засобів постачання енергії та використання засобів проміжного зберігання енергії.

В Україні дана проблематика має особливу актуальність внаслідок дефіциту паливних ресурсів, наслідками воєнних дій та зміною традиційних способів виробництва, розподілу і споживання енергії. Об'єктом дослідження виступили процеси перетворення, балансування та керування потоками енергії з ВДЕ та установками зберігання електроенергії (УЗЕ), а метою визначено забезпечення стабільності параметрів частоти й напруги при зміні режимів роботи, розроблення методів адаптивного керування параметрами інверторів та балансування потужності шляхом використання УЗЕ.

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

Обґрунтованість основних положень дисертації та отриманих результатів забезпечено шляхом застосування перевірених 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, 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, що враховує динамічну зміну режимів роботи інверторів в мережі та відокремлено залежно від поточного стану відновлюваних джерел енергії, систем зберігання енергії, параметрів зовнішньої мережі та критеріїв оптимальності. Запропонований метод дозволяє забезпечити автоматичне узгодження між режимами максимальної надійності, мінімальної деградації УЗЕ та максимального коефіцієнта корисної дії. На відміну від традиційних схем, запропонований метод забезпечує адаптивну зміну параметрів регуляторів та структури керування в режимі реального часу;

- вдосконалено математичні моделі режимів локальних комбінованих систем шляхом введення до структури моделі технологічних конфліктів між надійністю, енергоефективністю та деградацією систем зберігання. Запропонована модель одночасно враховує стохастичний характер генерації ВДЕ, динамічні характеристики інверторів, обмеження УЗЕ, вимоги до якості електроенергії та параметри перехідних процесів. Це 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 ЛКСЕ;

- вдосконалено метод оцінювання динамічної стійкості локальних комбінованих систем шляхом інтеграції додаткових показників, таких як швидкість зміни частоти, час встановлення, здатність обладнання зберігати працездатність при короткочасному провалі і підвищенні напруги, перерегулювання та інтегральний показник стабілізаційної здатності системи зберігання енергії, у єдину систему критеріїв оцінювання. Це забезпечує

можливість кількісного оцінювання компромісу між динамічною стійкістю та довговічністю УЗЕ, а також формування інтегрального індексу адаптивності системи;

- дістали подальший розвиток методи побудови цифрових двійників локальних енергетичних систем шляхом інтеграції моделей ВДЕ, інверторних ресурсів, систем зберігання енергії та алгоритмів адаптивного керування в єдине цифрове середовище, та методи адаптивного вибору режимів роботи ЛКСЕ на основі тривимірних карт адаптивності (карт режимів), які відображають області оптимального, допустимого та критичного функціонування системи. Це забезпечує можливість автоматизованого визначення оптимального режиму керування залежно від поточного стану ЛКСЕ та сценаріїв її функціонування.

Наукове значення дисертаційної роботи полягає у створенні сучасного методичного підґрунтя для підвищення стійкості, надійності та ефективності локальних комбінованих систем електрозабезпечення в умовах інерційного дефіциту та випадкових процесів генерування та споживання енергії. Запропоновані автором наукові рішення враховують сучасні тенденції розвитку локальних електроенергетичних систем, наявні проблеми та можливості їх вирішення.

Можна констатувати, що в дисертаційній роботі 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 проєктуванні та експлуатації локальних комбінованих систем електрозабезпечення, особливо важливих для об'єктів критичної інфраструктури, інформаційних центрів, тощо.

Практичне значення результатів підтверджено розробленням рекомендацій для об'єктів, де інтелектуальні системи керування забезпечують живлення телекомунікаційних вузлів та дата-центрів від впровадження адаптивного алгоритму. Отримані кількісні оцінки стійкості та розраховано очікуваний економічний ефект.

В додатку наведено 4 акти впровадження від наукової та виробничих установ, що підтверджує практичну значимість роботи.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

За своїм змістом дисертаційна робота здобувача С.В. 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 23 рисунків, 22 таблиць. Список використаної літератури налічує 76 найменувань. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків та списку використаних джерел, а також додатків.

У *вступі* обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, мету та основні завдання дослідження, вказано наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У *першому розділі* виконано аналіз сучасних тенденцій розвитку локальних комбінованих систем електрозабезпечення на основі відновлюваних джерел енергії. Розглянуто особливості інверторно-орієнтованих енергетичних систем, алгоритми керування з інверторними ресурсами, формалізовано наявні технологічні конфлікти, обґрунтовано необхідність адаптивного багаторівневого керування.

У *другому та третьому розділах* з'ясовано вимоги та шляхи забезпечення роботи комбінованих систем електрозабезпечення, розроблено математичні моделі та методи адаптивного керування локальними комбінованими системами електрозабезпечення. Сформовано багаторівневу структуру керування, запропоновано зведений критерій адаптивності та метод побудови карт режимів.

У *четвертому розділі* проведено моделювання, аналіз та оцінювання практичних режимів роботи комбінованої системи електрозабезпечення. Створено цифровий двійник з урахуванням стохастичних моделей. Сформовано сценарії роботи, виконано моделювання перехідних процесів, проведено аналіз ресурсних характеристик та оцінено вплив різних алгоритмів керування на динамічну стійкість системи. Побудовано карти адаптивності, виконано порівняння режимів роботи системи за критеріями надійності, енергоефективності та деградації УЗЕ. Запропоновано рекомендації.

У *висновках* наведено основні результати дисертаційного дослідження, визначено обмеження та запропоновано перспективні напрями подальших досліджень у сфері керування локальними комбінованими системами електрозабезпечення на основі ВДЕ.

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».

Зі звіту подібності за результатами перевірки дисертаційної роботи на текстові співпадіння випливає, 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.

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. 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

1. Автор використовує значну кількість скорочень та аббревіатур, спеціальних позначень, що ускладнює розуміння матеріалу.

2. Моделювання та оптимізація виконувалися для певної структури та параметрів локальної енергосистеми в конкретних умовах. Не зазначено, наскільки типовими є ці умови і наскільки результати можуть відрізнятися для систем з іншою структурою генерації, навантаження або топологією мережі. Автор визнає обмеженість пропонованих підходів.

3. Підхід до оцінки технічної деградації систем зберігання енергії є спрощеним і не враховує можливого впливу нелінійних ефектів.

4. Викладення матеріалу загалом чітко та стилістично виважене, проте присутня певна кількість орфографічних та лексичних помилок, а також є певні структурні неточності. В даному випадку це не вплинуло на розуміння тексту.

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

«26» серпня 2026 р.

Підпис к.т.н. Д. Бондаренка засвідчую:
Вчений секретар Інституту відновлюваної
енергетики НАН України, к.геол.н.



Дмитро БОНДАРЕНКО

Дарія ЧЕРНИШ