ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу Любарцева Вадима Володимировича на тему **«Прогнозування та оптимізація режимів роботи систем електропостачання з розподіленою генерацією»**, подану на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

В сучасних умовах спостерігається стрімке зростання зацікавленості наукової спільноти до питань прогнозування електричних навантажень, що супроводжується посиленим фокусом на розвиток відновлюваних джерел енергії та електричних мереж з розподіленою генерацією. Така тенденція зумовлена низкою факторів, зокрема актуальними змінами у законодавчій базі, що посилюють відповідальність споживачів і постачальників за небаланси в енергосистемі, а також технологічним прогресом і здешевленням обладнання для «зеленої» генерації, що підвищує її економічну доцільність та доступність.

Особливої актуальності питання розвитку розподіленої генерації набуває в умовах українських реалій, коли енергетична інфраструктура зазнає систематичних руйнувань унаслідок збройної агресії. Постійні удари по об'єктах критичної енергетичної інфраструктури, таких як теплоелектроцентралі, гідроелектростанції, магістральні підстанції, які забезпечують передачу потужності від атомних електростанцій, значно ускладнюють стабільне функціонування централізованої енергосистеми. У цьому контексті поступовий перехід до децентралізованих форм генерації електроенергії дозволяє знизити вразливість електромереж до зовнішніх впливів та зменшити ризики масових відключень.

У цих умовах завдання точного прогнозування режимів роботи електромереж, особливо з урахуванням розподілених джерел генерації, стає ключовим фактором забезпечення їх ефективності, надійності та стабільності. Отже, наукові дослідження у сфері прогнозування та оптимізації режимів функціонування електромереж з розподіленою генерацією мають надзвичайно високу практичну й стратегічну значущість для майбутнього енергетичного сектору України.

Дисертація виконана в рамках наукових досліджень кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка» та кафедри автоматизованих систем електропостачання та електроприводу Приазовського державного технічного університету, зокрема за держбюджетною темою «Оптимізація режимів систем електропостачання в мережах з розподіленою генерацією» (№ держреєстрації 0118U006918).

Мета дисертаційної роботи полягає у розробці методів прогнозування режимів електричних мереж з розподіленою генерацією цілком, без розділення на

окремі складові (генерацію, споживачів) при різному відношенні встановленої потужності ВДЕ до встановленої потужності всієї генерації в електромережі.

2. Короткий аналіз змісту дисертації, відповідність його поставленим задачам

Дисертаційна робота написана грамотною державною мовою. Структура роботи є цілісною та взаємопов'язаною. Стиль викладення результатів теоретичних і практичних досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття та використання.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 180 сторінок, з яких основний зміст викладений на 125 сторінках, список використаних джерел налічує 107 найменувань. Оформлення дисертаційної роботи відповідає вимогам чинних стандартів.

У першому розділі *«Аналіз сучасних досліджень в області прогнозування електричних навантажень та оптимізації режимів роботи електричних мереж»* проаналізовано розповсюджені на сьогодні методи прогнозування електричних навантажень, зокрема статистичні підходи та методи машинного навчання. Основним показником ефективності використовується середня абсолютна похибка у відсотках, MAPE, %. Встановлено, що статистичні моделі мають похибку понад 10%, тоді як нейронні мережі досягають точності 2–10%, хоча потребують складнішої підготовки даних. Значна увага приділена зростаючій ролі просьюмерів у формуванні режимів розподіленої генерації. Визначено, що для точного прогнозування необхідно враховувати зовнішні фактори, насамперед погодні умови.

У другому розділі *«Вибір методів для прогнозування електричних навантажень та режимів роботи електричних мереж з розподіленою генерацією»* досліджено вплив ВДЕ на зміну профілю навантаження в мережі. Встановлено, що за умов 15% інтеграції ВДЕ тривалість пікового навантаження може зменшитись на 18%, але зростає коливання навантажень. Порівняння методів прогнозування показало, що застосування нейронних мереж знижує похибку до 1,08%, у порівнянні з 18,28% при прогнозуванні за середнім значенням. Це підтверджує потребу врахування динамічних зовнішніх чинників для точного прогнозу в мережах з розподіленою генерацією.

У третьому розділі «*Використання нейронних мереж для прогнозування та оптимізації режимів у мережі з розподіленою генерацією. Оптимізація режимів реактивної потужності*» розглянуто прогнозування генерації СЕС і ВЕС за допомогою нейронних мереж, а також прогнозування та оптимізація перетоків реактивної потужності. Для СЕС досліджено вплив типу джерела даних про інсоляцію: при використанні «Моделі чистого неба» MAPE варіюється в межах −3,86…5,74%, тоді як при реальних вимірюваннях – −0,97…4,91%. Проведено

аналіз кореляції генерації з метеопараметрами, де найвищу значущість має інсоляція, температура панелей і швидкість вітру. Доведено, що використання питомої генерації на одиницю інсоляції P^* дозволяє підвищити точність генерації СЕС, а також зменшити вибірку вхідних даних, необхідних для навчання. Для ВЕС виконано прогнозування з урахуванням часу, температури, вітру та тиску; середні похибки коливаються у межах −2,46…4,91%. Встановлено, що для надійного прогнозу необхідно щонайменше 2000 значень у навчальній вибірці.

У четвертому розділі *«Реалізація моделі нейронної мережі для прогнозування електричних навантажень та режимів роботи електричних мереж з розподіленою генерацією»* розроблено модель МРГ у середовищі MATLAB/Simulink, що включає різні типи споживачів та джерел генерації. Моделювання на основі реальних метеопараметрів та даних споживання показало, що прогнозування добового навантаження нейронною мережею дало MAPE в межах 7,67–10,51% залежно від рівня інтеграції ВДЕ.

3. Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій

Дисертаційне дослідження Любарцева В.В. виконано на достатньо високому науково-технічному рівні. Рівень обґрунтованості сформульованих у роботі наукових положень і висновків є достатнім і підтверджується результатами комплексних досліджень, що поєднують застосування відомих теоретичних підходів та експериментальних методів. У процесі дослідження автор ґрунтувався на сучасних досягненнях та напрацюваннях вітчизняних і зарубіжних науковців у галузі математичного моделювання електроенергетичних систем, теорії штучних нейронних мереж та обробки даних, технічній складовій ВДЕ та їх інтеграції в електричні мережі.

4. Достовірність результатів дослідження

Достовірність наукових результатів, висновків і рекомендацій підтверджується апробацією основних положень дисертаційного дослідження Любарцева В.В. на низці всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференцій. Проведений аналіз дисертаційної роботи свідчить, що автор глибоко опрацював наукові джерела інформації, а також дослідив питання створення та налаштування нейронних мереж для задач прогнозування та оптимізації режимів роботи мереж з розподіленою генерацією. В роботі використано сучасні підходи, такі як: методи математичного моделювання енергетичних режимів з урахуванням інтеграції відновлюваних джерел електроенергії; статистичні підходи до прогнозування навантажень; методи машинного навчання, зокрема штучні нейронні мережі для прогнозування генерації сонячних та вітрових електростанцій; кореляційний аналіз метеорологічних параметрів з показниками генерації;

моделювання режимів роботи розподілених мереж у середовищі MATLAB/Simulink з використанням реальних даних навантаження та метеопараметрів а також алгоритми оптимізації на основі прогнозних моделей для забезпечення ефективного функціонування електричних мереж з високим рівнем мінливості.

5. Повнота викладення основних наукових результатів дисертаційної роботи в надрукованих автором фахових публікаціях та інших наукових працях

Основні результати досліджень Любарцева В.В. за темою дисертації викладено у 14 наукових працях, з них дві опубліковані у наукових фахових виданнях, чотири роботи опубліковані у виданнях, що індексуються у наукометричній базі SCOPUS. Публікації за тематикою дисертації підтверджують оприлюднення всіх отриманих результатів.

6. Наукова новизна отриманих результатів

Наукова новизна результатів дисертаційного дослідження полягає в наступному:

– запропоновано метод прогнозування за допомогою штучних нейронних мереж, що дозволяє спрогнозувати режим роботи мереж з розподіленою генерацією одночасно з усіма складовими мережі (споживачів, ВЕС, СЕС);

– запропоновано використання питомої генерації на одиницю інсоляції P^*, як узагальненого індикатора впливу метеопараметрів, що дозволяє зменшити розбіжність між фактичними та прогнозованими графіками генерації СЕС;

– встановлено вплив частки потужності ВДЕ на похибку прогнозування режимів роботи мережі, зокрема при збільшенні потужності ВДЕ з 5% до 50 % похибка прогнозування зростає 7 до 10%.

7. Теоретична та практична значимість результатів дисертаційного дослідження

Запропонована в дисертації методика прогнозування може бути ефективно застосована ОСП та ОСР для підвищення точності управління режимами роботи мереж з розподіленою генерацією, зокрема шляхом покращення балансування, диспетчеризації та зниження ризиків, пов'язаних з нестабільністю генерації ВДЕ. Практична реалізація запропонованих методів здійснена на підприємствах АТ «Нікопольський завод феросплавів» та ТОВ «ДТЕК Покровська СЕС», де вони довели свою ефективність, отримали позитивну оцінку і сприяли підвищенню точності прогнозування та зменшенню витрат на небаланси.

Теоретична цінність роботи полягає у формуванні нових підходів до прогнозування режимів роботи мереж з розподіленою генерацією з урахуванням впливу метеорологічних факторів та змін у структурі споживання. Запропоновано використання питомої генерації як агрегованого параметра для підвищення точності

прогнозів, а також досліджено залежність похибки від рівня інтеграції ВДЕ. Робота поглиблює наукові засади моделювання й оптимізації режимів роботи децентралізованих енергосистем.

Матеріали досліджень використовуються в навчальному процесі кафедри електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка» а також кафедри автоматизації систем електропостачання та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

8. Зауваження до дисертаційної роботи

1. У розділі 2 забагато уваги приділяється аналізу особливостей та проблем мереж з розподіленою генерацією (стор. 43-50). Оскільки це не є основним завданням дослідження, то можна було обійтися посиланнями на першоджерела.
2. У розділі 3.2.1 (с. 87-90) наведено досить докладний аналіз публікацій на тему прогнозування генерації СЕС. Його було б більш доречно оформити у розділі 1 з аналізом досліджень в області прогнозування електричних навантажень. Також даний розділ присвячений одразу декільком питанням прогнозування виробництва електроенергії на СЕС: виконання прогнозування для СЕС з різними наборами вхідних даних, аналіз кореляційних залежностей між метеопараметрами та графіком генерації, аналіз їх впливу на точність прогнозування. Доцільніше розділити ці дослідження на декілька розділів;
3. У розділі 3.2.2 по аналогії з розділом 3.2.1 також наведений аналіз публікацій на тему генерації ВЕС, але кількість проаналізованих публікацій значно менша як і кількість виконаних досліджень, що може вказувати на фокусування саме на темі генерації СЕС, в той час як режими роботи вітрових станцій можуть мати ще більш стохастичний характер та потребують врахування не меншої кількості параметрів для прогнозування;
4. Недостатньо висвітлено процес вибору типу ШНМ, функції активації, параметрів навчання. В роботі є посилання на попередні дослідження, але доречно навести їх у тексті.
5. У розділі 4 в Simulink виконується моделювання роботи мережі з розподіленою генерацією з ціллю подальшого прогнозування режимів її роботи. Схема мережі та складові у Simulink представлено дуже спрощено, що може збільшити розбіг між моделлю та реальними умовами експлуатації таких мереж;
6. У розділі 3.1 не вказано ціну за електроенергію для підприємств, яка використовувалась при розрахунку економічного ефекту від підвищення точності прогнозування та подальшої оптимізації режиму реактивної потужності.
7. Установки збереження енергії (УЗЕ) на сьогодні є одним із елементів розподіленого генерування і їх вплив на прогнозування режимів електричних мереж варто враховувати. Те саме щодо впливу деградації фотоелектричних модулів, яка за

певних метеоумов може суттєво впливати на фактичне генерування СЕС і, відповідно, на похибки прогнозування.

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

9. Загальний висновок

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Любарцева Вадима Володимировича на тему **«Прогнозування та оптимізація режимів роботи систем електропостачання з розподіленою генерацією»** виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є закінченим науковим дослідженням, сукупність теоретичних та практичних результатів якого розв'язує наукове завдання, що має істотне значення для галузі 14 Електрична інженерія. Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 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 Любарцев Вадим Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 14 Електрична інженерія за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент:
професор кафедри електричних станцій і систем
Вінницького національного технічного університету,
доктор технічних наук, професор Петро ЛЕЖНЮК

Вчений секретар
к.т.н., доц. Інна ВІЛЬЧАК