

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію Любарцева Вадима Володимировича

«Прогнозування та оптимізація режимів роботи систем електропостачання з розподіленою генерацією», що представлена на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Актуальність роботи. Сучасний етап розвитку електроенергетичних систем характеризується інтенсифікацією наукових досліджень у галузі моделювання та прогнозування електричних навантажень, що безпосередньо пов'язано з глобальними трендами декарбонізації та інтеграцією відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Динаміка законодавчих змін, спрямованих на регулювання балансування енергосистем із залученням розподіленої генерації, формує нові вимоги до методології аналізу електромереж. Паралельне здешевлення технологій ВДЕ та підвищення їх енергоефективності пояснює необхідність переоцінки класичних підходів до управління енергосистемами.

В умовах систематичної дестабілізації централізованої енергетичної інфраструктури України внаслідок зовнішніх агресивних впливів, питання переходу до децентралізованих моделей генерації набуває характеру національної стратегічної необхідності. Руйнування ключових вузлів енергомережі (магістральних ліній передачі, базових генеруючих потужностей) актуалізує розробку методів, орієнтованих на створення стійких до зовнішніх загроз мережевих конфігурацій. При цьому прогнозування режимів функціонування таких систем має враховувати не лише технологічні параметри, а й соціально-економічні фактори кризового середовища.

Розробка інтегрованих методів прогнозування, що враховують систему як єдине ціле без поділу на генераційні та споживчі компоненти, є важливим напрямом підвищення точності й адекватності математичних моделей в умовах змінного співвідношення між потужностями відновлюваних джерел енергії та традиційної генерації. Застосування таких методів дозволяє здійснювати всебічний аналіз взаємозв'язків у складних, структурно неоднорідних електромережах, забезпечує гнучкість моделювання з урахуванням поточних змін у структурі генерації, а також

сприяє зниженню ймовірності розвитку каскадних аварій завдяки підвищенню точності прогнозів.

Дослідження виконувались на кафедрі електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка» та кафедри автоматизації систем електропостачання та електроприводу Приазовського державного технічного університету.

Основна мета роботи – створення уніфікованого методичного апарату для прогнозування режимів електромереж із довільним рівнем проникнення ВДЕ, що є критично важливим для формування адаптивних стратегій відновлення енергетичного сектору України.

Ступінь обґрунтованості отриманих у дисертації наукових положень.

Дисертаційна робота Любарцева В.В. характеризується належним рівнем науково-технічного опрацювання. Сформульовані в ній наукові положення та висновки є логічними, обґрунтованими й підтвердженими результатами комплексних досліджень, у яких поєднано використання сучасного математичного апарату з експериментальною перевіркою. У ході виконання роботи автор спирався на досягнення провідних наукових шкіл, застосовуючи як фундаментальні підходи в галузі моделювання електроенергетичних систем, так і сучасні інструменти, зокрема методи штучного інтелекту, зокрема штучних нейронних мереж, засоби інтелектуального аналізу даних, а також враховував особливості функціонування та інтеграції відновлюваних джерел енергії в структуру електричних мереж.

Достовірність результатів досліджень. Достовірність отриманих результатів підтверджується порівнянням з результатами експериментальних досліджень. Методи дослідження базуються на теорії ймовірностей, математичного моделювання, експертних оцінок, теорії штучних нейронних мереж, методів обробки даних, кореляційного аналізу, моделювання у пакеті програм MATLAB/Simulink.

Результати досліджень пройшли апробацію на восьми міжнародних наукових конференціях та отримали позитивну оцінку.

Наукова новизна. Наукова новизна дослідження Любарцева В.В. полягає у кількох ключових положеннях. Так, експериментально встановлено, що збільшення частки встановленої потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до 50% у структурі мережі з розподіленою генерацією призводить до суттєвого зростання похибки прогнозування перетоків потужності, яка може досягати 30%. Це явище пояснюється поєднанням високої варіативності генерації ВДЕ та складними динамічними електромагнітними процесами в енергосистемах з обмеженою встановленою потужністю, що вказує на обмеження традиційних моделей балансування в умовах значної декарбонізації.

У роботі запропоновано використання показника питомої генерації на одиницю інсоляції (P^*) як узагальненого індикатора впливу метеорологічних параметрів. Цей підхід дозволяє зменшити розмірність вхідних даних без втрати їх інформативності, уніфікувати вплив кліматичних факторів та підвищити стабільність навчання штучних нейронних мереж. В результаті застосування P^* вдалося знизити розбіжність між фактичними та прогнозованими графіками генерації сонячних електростанцій на 20%, що є вагомим кроком у оптимізації підготовки даних для моделей прогнозування.

Розроблено комплексний підхід до прогнозування режимів роботи мереж з розподіленою генерацією, який враховує основні типи джерел генерації, зокрема сонячні і вітрові електростанції, а також споживачів, інтегруючи метеопараметри у часовій перспективі. Доведено, що зі збільшенням частки встановленої потужності ВДЕ похибка прогнозування закономірно зростає: з 7,67% при 5% ВДЕ до 10,51% при 50% ВДЕ. Це має особливе значення для формування адаптивних стратегій управління енергомережами, особливо в умовах України, де енергетична інфраструктура зазнає системних викликів.

Отримані результати створюють наукову базу для розробки кризостійких моделей енергопостачання, що є надзвичайно актуальним для регіонів із частковим руйнуванням централізованої інфраструктури. Впровадження запропонованої методології прогнозування дозволить знизити технологічні втрати в мережах з високою часткою ВДЕ, що сприятиме підвищенню надійності та ефективності енергосистеми загалом.

Практичне значення. У дисертації представлено методику прогнозування, яка має прикладне значення для системних та операторів розподілу електроенергії (ОСП та ОСР) у контексті підвищення ефективності управління режимами роботи електромереж з інтегрованими джерелами розподіленої генерації. Зокрема, зазначена методика сприяє покращенню процесів балансування, диспетчеризації та зниженню ризиків, пов'язаних з нестабільністю виробництва електроенергії з відновлюваних джерел. Практичне впровадження розроблених підходів здійснено на прикладі АТ «Нікопольський завод феросплавів» та ТОВ «ДТЕК Покровська СЕС», де вони підтвердили свою ефективність, отримали позитивну оцінку з боку фахівців і забезпечили підвищення точності прогнозування, а також зменшення витрат, пов'язаних із небалансами.

Результати дослідження також знайшли практичне застосування у навчальному процесі, зокрема на кафедрі електроенергетики НТУ «Дніпровська політехніка» та кафедрі автоматизації систем електропостачання та електроприводу ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет».

Оцінка змісту дисертації. Дисертаційне дослідження виконане державною мовою з дотриманням норм наукового стилю. Структурна організація матеріалу є логічно послідовною та забезпечує цілісність викладу. Використання чіткої термінології, обґрунтованих висновків і рекомендацій сприяє зрозумілості та практичній цінності представлених результатів.

Робота складається зі вступної частини, чотирьох основних розділів, висновків, переліку джерел (107 позицій) і додатків. Загальний обсяг становить 180 сторінок, з яких основний зміст подано на 125 сторінках. Оформлення дисертації відповідає чинним нормативним вимогам щодо підготовки наукових робіт.

У першому розділі здійснено систематизацію сучасних методів прогнозування електричних навантажень, зокрема статистичних моделей та алгоритмів машинного навчання. Показано, що середня абсолютна відносна похибка (MAPE) для традиційних статистичних підходів перевищує 10%, тоді як використання штучних нейронних мереж дозволяє знизити цей показник до 2–10%, хоча й потребує більш складної підготовки вхідних даних. Окремо проаналізовано вплив просьюмерів на

формування режимів роботи розподіленої генерації. Встановлено, що для підвищення точності прогнозу необхідно враховувати метеорологічні та інші зовнішні чинники.

Другий розділ присвячено аналізу впливу відновлюваних джерел енергії на профіль електричних навантажень. Виявлено, що при частці ВДЕ у 15% тривалість пікового навантаження скорочується на 18%, проте зростає амплітуда коливань. Порівняльний аналіз методів прогнозування показав перевагу нейронних мереж, які забезпечують зниження MAPE до 1,08% порівняно з 18,28% для методу середнього значення, що підтверджує необхідність врахування динамічних зовнішніх факторів у таких мережах.

У третьому розділі детально розглянуто прогнозування генерації сонячних і вітрових електростанцій із використанням нейронних мереж, а також оптимізацію перетоків реактивної потужності. Для СЕС досліджено вплив різних джерел даних про інсоляцію: при використанні моделі «Чистого неба» MAPE становить $-3,86...5,74\%$, а при реальних вимірюваннях $-0,97...4,91\%$. Проведено кореляційний аналіз між генерацією та метеопараметрами, де найбільшу інформативність мають інсоляція, температура панелей і швидкість вітру. Встановлено, що застосування питомої генерації на одиницю інсоляції (P^*) підвищує точність прогнозу та зменшує обсяг необхідних вхідних даних. Для ВЕС прогнозування здійснювалося з урахуванням часу, температури, швидкості вітру та тиску, середня похибка склала $-2,46...4,91\%$.

У четвертому розділі представлено розробку моделі мережі з розподіленою генерацією у середовищі MATLAB/Simulink, яка охоплює різні категорії споживачів та джерел генерації. Моделювання на основі реальних даних споживання та метеопараметрів показало, що добове прогнозування навантаження із застосуванням нейронної мережі забезпечує MAPE в межах 7,67–10,51% залежно від рівня інтеграції ВДЕ.

Повнота викладення результатів дослідження в опублікованих працях.

Основні положення та результати дисертаційного дослідження представлені у 14 наукових публікаціях, серед яких дві опубліковані у фахових наукових виданнях

України, а чотири у журналах, що індексуються у міжнародній наукометричній базі Scopus. Така публікаційна активність засвідчує повне і своєчасне оприлюднення основних результатів дослідження та свідчить про їх наукову апробацію.

Зауваження щодо змісту й оформлення дисертаційної роботи.

1. У розділі 4.2 представлено особливості та переваги пакету програм MATLAB/Simulink, однак відсутній аналіз або порівняння з іншими аналогічними програмними засобами. Порівняльний аналіз дозволив би більш обґрунтовано обрати середовище моделювання з урахуванням специфіки поставлених задач, рівня деталізації моделей, гнучкості налаштувань, доступності бібліотек відновлюваних джерел енергії та можливостей інтеграції з іншими програмами.

2. Використання прогнозування за середнім значенням є застарілим, і його порівняння з сучасними, в тому числі статистичними методами, є малоінформативним, оскільки воно не відображає реальної динаміки зміни навантаження та ігнорує вплив ключових факторів, таких як погодні умови, добові та сезонні коливання.

3. Виконання прогнозування режимів роботи мереж з розподіленою генерацією за допомогою лише нейронних мереж прямого поширення (feedforward network) є слушним і має свої переваги, зокрема швидкість обчислень. Водночас, варто звернути увагу на те, що в сучасних дослідженнях у цій галузі часто застосовують більш різноманітні архітектури нейронних мереж, які можуть краще враховувати часові залежності та складні взаємозв'язки в даних. Тому рекомендується розглянути можливість включення до подальших досліджень інших типів нейронних мереж, зокрема рекурентних та глибинних моделей, для порівняння їх ефективності.

4. У таблиці 4.3 розділу 4.1 наведені варіанти частки встановленої потужності ВДЕ при моделюванні, але не вказано яким чином досягалась величина цієї частки при моделюванні (кількістю генеруючих одиниць, або їх потужністю). Слід зауважити, що у разі збільшення встановленої потужності шляхом підвищення одиничної потужності ВДЕ, не змінюючи їх кількість, ми фактично моделюємо систему, яка може суттєво відрізнятися від реальних умов експлуатації. Такий підхід

може призвести до отримання результатів, які не відображають особливостей роботи розподіленої генерації у реальних мережах, зокрема з точки зору її впливу на режими електроспоживання, напругу та надійність електропостачання. Тому доцільним є уточнення методики формування зазначених сценаріїв, аби забезпечити адекватність моделювання практичним умовам.

5. У таблицях 3.8 та 3.9 розділу 3.2 наведено нульові значення коефіцієнта кореляції між такими метеорологічними параметрами, як інтенсивність опадів та абсолютна кількість опадів, що є методологічно сумнівним, оскільки наявність опадів зазвичай асоціюється зі значним зниженням генерації сонячної електричної станції (СЕС) через зменшення інсоляції. Крім того, від'ємні значення рівня забруднення сонячних панелей є фізично некоректними, оскільки показник забруднення не може приймати від'ємні значення; цей аспект необхідно враховувати при подальшому аналізі та інтерпретації отриманих результатів.

6. Не представлено кінцевий продукт для прогнозування, яким можуть користуватись споживачі, що дещо знижує прикладну цінність отриманих результатів. Разом із тим, запропонована методика є обґрунтованою, логічно структурованою та може слугувати основою для створення практичного інструменту в подальших розробках.

На погляд опонента зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Любарцева В.В.

ВИСНОВОК

Дисертаційна робота Любарцева Вадима Володимировича на тему «Прогнозування та оптимізація режимів роботи систем електропостачання з розподіленою генерацією» є самостійним, завершеним науковим дослідженням, результати якого мають важливе значення для розвитку електроенергетичної галузі. Представлений матеріал відзначається високим рівнем наукової обґрунтованості, внутрішньою логічною послідовністю та відповідністю принципам академічної доброчесності. Отримані автором теоретичні положення та практичні рекомендації

спрямовані на розв'язання актуального наукового завдання, що відповідає сучасним викликам у сфері функціонування систем з розподіленою генерацією.

За своїм змістом, ступенем наукової новизни, практичною спрямованістю та актуальністю виконана дисертація повністю відповідає критеріям, встановленим пунктами 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.

Вважаю, що здобувач Любарцев Вадим Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент,

доцент кафедри "Електричні та електронні апарати"

Національного університету «Запорізька політехніка»

кандидат технічних наук, доцент

«12» червня 2025 р.

Михайло КОЦУР

Підпис Михайла КОЦУРА засвідчую,

учений секретар

Національного університету «Запорізька політехніка»

кандидат соціологічних наук, доцент

Віктор КУЗЬМІН

