

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
ШИМАНЮКА Павла Вячеславовича

“Короткострокове прогнозування вузлових електричних навантажень в розподільних мережах”, що подана на здобуття наукового ступеню доктора філософії з галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації

Прогнозування споживання електричної енергії є надважливим завданням під час планування та оперативного керування режимом електроенергетичної системи. Своєчасне отримання інформації щодо майбутнього навантаження електричної системи дозволяє оптимізувати режим та забезпечити його безперебійність електропостачання. Складність задачі прогнозування електричного навантаження обумовлена стохастичним характером процесів споживання електричної енергії відповідно до циркадних добових ритмів, пори року, погодних умов, технічного стану обладнання, соціально-економічних факторів тощо. Додаткові виклики створює введення відновлювальних джерел енергії із негарантованою потужністю, що ускладнює задачу балансування потужності та розширює варіативність сумарного навантаження локальних електричних систем.

Варто зазначити, що задача прогнозування електроспоживання не нова, її розв'язанням займаються фахівці в області передачі та розподілу електроенергії багато десятиліть. Відомі підходи до розв'язання задачі базуються на математичних моделях та методах аналізу часових рядів, авторегресійних моделях, методах експоненційного згладжування тощо. На сьогодні актуальною постає задача забезпечення прийнятної точності прогнозів.

Особливої актуальності дана задача набуває в умовах впровадження нової моделі ринку електричної енергії, коли похибки прогнозування можуть зумовлювати істотні комерційні втрати операторів системи розподілу та системи передачі електричної енергії. Водночас слід пам'ятати і про технічну складову проблеми. Так, недооцінювання обсягів споживання електроенергії призводить до зниження якості енергопостачання, а переоцінювання – до невиправданих витрат палива та неекономічності режимів електричних станцій.

Одним з найперспективніших напрямів забезпечення достатньої точності прогнозування є застосування технологій штучних нейронних мереж, які дозволяють виявити приховані неочевидні закономірності в процесах споживання електроенергії. Саме розв'язанню **актуальної** науково-технічної задачі короткострокового прогнозування вузлових електричних навантажень з

використанням штучних нейронних мереж глибинного навчання присвячено дисертаційне дослідження Павла Шиманюка.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Підтвердженням важливості та необхідності проведення наукових досліджень, результати яких представлено у дисертаційній роботі є те, що вони проводились протягом останніх років за науковим напрямом Інституту електродинаміки НАН України, зокрема під час виконання науково-дослідних робіт: «Розвиток засобів комп'ютерного моделювання ЕЕС для оперативного та короткострокового прогнозування навантаження та рівня стійкості ОС України» (№ДР 0115U005309); «Розробка методів та засобів короткострокового прогнозування вузлових електричних навантажень електроенергетичних систем в ринкових умовах» (№ ДР 0119U002810); «Науково-технічні засади розвитку та керуваності сегменту розосереджених джерел енергії в структурі генеруючих потужностей електроенергетичних систем» (№ДР 0117U007711); «Прогнозування сумарного небалансу електричної енергії в ОЕС України та його вплив на кінцеву вартість електричної енергії» (№ДР 0121U111848). В зазначених роботах здобувач брав участь як виконавець.

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень

Результати виконання дисертаційного дослідження містять елементи наукової новизни, зокрема:

- вперше розроблено метод багатофакторного короткострокового прогнозування вузлового електричного навантаження з використанням штучної нейронної мережі з модулем довго короткострокової пам'яті та обхідним з'єднанням і паралельною гілкою прихованих шарів для обробки та врахування впливу зовнішніх факторів, що дозволило зменшити похибку прогнозування вузлового навантаження у порівнянні з іншими методами прогнозування;

- розроблено новий метод аналізу даних для виявлення та заміни аномальних значень та пропусків значень вузлового електричного навантаження шляхом виконання двоетапного аналізу з використанням методу кластеризації даних та декомпозиції часових рядів, а також заміни аномальних значень за допомогою лінійної інтерполяції, що дозволило зменшити кількість виявлення хибних значень та в подальшому підвищити точність короткострокового прогнозування вузлових навантажень.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувача

Основні положення дисертації, висновки та рекомендації достатньо обґрунтовані. Достовірність отриманих наукових результатів підтверджується

коректними постановкою завдання; застосуванням здобувачем методів аналізу часових рядів, математичної статистики, оптимізації, комп'ютерного моделювання, машинного навчання та методів розрахунку режимів електричних систем.

Верифікацію результатів прогнозування електричного навантаження за допомогою запропонованої здобувачем штучної нейронної мережі здійснено на фактичних ретроспективних даних режимів енергосистем України та світу.

Наукове значення та практична цінність отриманих результатів

Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі результатів виконаних досліджень розв'язано задачу забезпечення прийнятної точності короткострокового прогнозування електричних навантажень вузлів та очікуваних втрат електричної енергії в розподільних мережах з урахуванням зовнішніх факторів, зокрема температури повітря. Це, очевидно, дозволить ефективно вирішити проблему оперативного балансування режиму електроенергетичної системи та зменшити додаткові комерційні втрати операторів системи розподілу, пов'язані з операціями на Балансуючому ринку.

Практична цінність підтверджується використанням отриманих результатів досліджень під час підготовки аналітичних матеріалів щодо виявлення аномальних значень даних вузлового електричного навантаження для ТОВ «ДТЕК Мережі» та в освітній процес підготовки магістрів за освітніми програмами «Системи забезпечення споживачів електричною енергією» та «Енергетичний менеджмент, електропостачання та інжиніринг електротехнічних комплексів» в Навчально-науковому інституті енергозбереження та енергоменеджменту КПІ ім. Ігоря Сікорського.

Оцінка публікацій здобувача.

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 13 наукових робіт, серед яких 2 статті у складі колективних монографій, що проіндексовані в базі даних Scopus, 2 статті в періодичних виданнях категорії «А» з індексацією в базі даних Scopus, 6 статей у фахових виданнях України категорії «Б» та 1 авторське свідоцтво на комп'ютеру програму.

Для публікацій, які виконано у співавторстві, вказано доробок автора дисертації. Зміст публікацій відповідає матеріалам, викладеним в дисертації.

Основні результати дослідження достатньо апробовані. Вони доповідались здобувачем та обговорювались на 7 міжнародних наукових та науково-технічних конференціях, у тому числі на 2 конференціях, матеріали яких проіндексовано в наукометричній базі даних Scopus; наукових семінарах відділу моделювання електроенергетичних об'єктів та систем та в літній школі Інституту електродинаміки НАН України.

Структура та зміст дисертації

Структурно дисертаційна робота Павла Шиманюка складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 154 сторінки. Основний зміст викладено на 135 сторінках друкованого тексту. Робота проілюстрована 25 таблицями та 46 рисунками. Список використаних джерел містить 103 найменування, з них 51 кирилицею та 52 латинецею.

Вступ містить обґрунтування теми дисертаційного дослідження, зв'язок роботи з науковими програмами та темами, мету та завдання дослідження, визначення об'єкта та предмета дослідження, опис застосованих методів дослідження, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію роботи, наукові публікації та особистий внесок здобувача в публікаціях у співавторстві.

Перший розділ містить загальну інформацію про задачі прогнозування електричного навантаження в умовах впровадження нової моделі ринку електричної енергії в Україні. Представлено огляд та проаналізовано класичні методи прогнозування вузлового навантаження в розподільних електричних мережах: експоненціального згладження, векторної авторегресії, штучних нейронних мереж для прогнозування часових рядів, рекурентних штучних нейронних мереж з довго короткостроковою пам'яттю. За результатами визначено актуальне наукове завдання дослідження.

У другому розділі представлено розв'язання задачі короткострокового прогнозування вузлового електричного навантаження за допомогою штучної нейронної мережі. Наведено методики оцінювання якості прогнозу. На основі аналізу публікацій обґрунтовано та розроблено архітектуру комбінованої штучної нейронної мережі глибинного навчання на основі багатопшарового перцептронну MLP з блоком довго короткострокової пам'яті LSTM. Представлено результати однофакторного прогнозування вузлового навантаження та прогнозування з урахуванням температури повітря. Представлена комп'ютерна модель короткострокового прогнозування вузлового електричного навантаження.

В третьому розділі представлено результати розв'язання задачі забезпечення достовірності даних часових рядів вузлового навантаження на етапі навчання штучної нейронної мережі. Представлено результати дослідження методів достовіризації даних та виявлення аномальних даних та пропусків вимірювання навантаження. Представлено розроблений автором алгоритм двоетапної кластеризації даних, який базується на методі DBSCAN. Наведено результати дослідження похибки прогнозування вузлового навантаження із застосуванням алгоритму достовіризації даних.

Четвертий розділ дисертації присвячений дослідженню впливу додаткових факторів на точність прогнозу вузлових навантажень. Представлено розв'язання задачі прогнозування втрат електричної енергії в розподільних мережах із застосуванням розробленої автором штучної нейронної мережі. Наведено інформацію про тестову схему електричної мережі CIGRE для розрахунку втрат електричної енергії, адаптовану автором до умов України.

Висновки по дисертації є коректними та відображають наукові та практичні результати, отримані автором.

Список використаної літератури із 103 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації за темою дисертаційних досліджень.

В *додатках* до дисертаційної роботи наведено список публікацій автора, довідки щодо впровадження результатів досліджень в ТОВ «ДТЕК Мережі» та навчальний процес кафедри електропостачання КПП ім. Ігоря Сікорського та акторське свідоцтво на розроблену автором комп'ютерну програму.

Матеріал дисертації викладено логічно та послідовно, відповідно до визначеної мети та завдань дослідження. Дисертація написана з використанням сучасної наукової термінології та оформлена відповідно до вимог чинних стандартів та норм.

Зауваження

1. До складу ключових слів внесено поняття «втрати». Це поняття є дуже широким і не зрозуміло, про які саме втрати йдеться – технологічні втрати потужності на передачу та розподіл електричної енергії, втрати енергії за певний період часу, або комерційні втрати суб'єктів ринку електричної енергії.

2. Вступна частина дисертації щодо обґрунтування вибору теми дослідження перевантажена самоцитуванням автора та публікацій наукового керівника. Як результат – вторинне цитування, наприклад, інформації про втрати електроенергії в енергосистемах України та світу (стор. 20).

3. Підрозділ 1.1 дисертації містить загальновідому інформацію про функціонування ринку електричної енергії в Україні. Цю інформацію можна було б скоротити та зосередитись на проблемі забезпечення точності прогнозування споживання електричної енергії.

4. Дані щодо типів вузлів навантаження, представлені на стор. 40 не інформативні, оскільки не наведена схема досліджуваної електричної мережі.

Також в роботі відсутня інформація про схеми електричних мереж енергосистем, які було використано для апробації роботи штучної нейронної мережі (клас номінальної напруги, конфігурація схеми, характеристики навантажень споживачів тощо), що ускладнює сприйняття викладеного матеріалу.

Окреме зауваження по схемі енергосистеми Туреччини. На стор. 83 автор говорить про розмірність схеми 970 вузлів, у той час, коли за посиланням [95] йдеться про схему із 116 вузлами.

5. З роботи незрозуміло, про які показники вузлового електричного навантаження йдеться. Якщо це потужність навантаження, то чому, наприклад, на рис. 2.8 (стор. 78) вісь ординат графіку прогнозу навантаження відкалібрована у МВт·год. У разі, якщо мова йде про енергію, виникає питання: за який проміжок часу визначається такий інтегральний показник?

Аналогічне зауваження стосується прогнозування втрат потужності або енергії.

6. Додаткових пояснень потребує теза автора про зв'язок збільшених втрат електроенергії в енергосистемах України з неточністю прогнозу навантажень (стор. 121).

7. З роботи незрозуміло, для якого класу номінальної напруги розподільних електричних мереж призначена розроблена автором штучна нейронна мережа. Відомо, що закономірності процесів, пов'язаних з відбором потужності на рівні 10/0,4 кВ та 110/35 кВ істотно відрізняються, зокрема із збільшенням класу номінальної напруги нерівномірність графіків навантаження зменшується. Таким чином, окремого дослідження потребує аналіз поведінки штучної нейронної мережі під час прогнозування за різного ступеню нерівномірності графіків навантаження.

7. З роботи незрозуміло, чи дозволяє розроблена автором штучна нейронна мережа здійснювати прогноз навантаження локальних електричних систем із відновлювальними джерелами енергії? Чи дозволяє нейронна мережа врахувати такі додаткові фактори, як азимут сонця, хмарність, швидкісний натиск вітру тощо? Чи потребуватиме таке врахування внесення змін в архітектуру нейронної мережі?

8. Робота містить ряд неточностей в записах формул, наприклад, у формулах (1.2) на стор. 30, (2.4) на стор. 59, (2.17) на стор. 64, (3.1) на стор. 90.

В деяких місцях роботи не зазначено одиниці вимірювань даних, наприклад, в табл. 1.1 на стор 52, табл. 2.4 на стор. 71, табл. 3.2 на стор. 85, табл. 3.5 на стор. 105 тощо.

Потребують пояснення позначення, використані в алгоритмах прогнозування часових рядів, представлених на стор. 56-57.

В роботі міститься певна кількість орфографічних помилок та стилістично неузгоджених речень. Наприклад, пропущене слово в заголовку підрозділу 1.3 на стор. 41.

Зазначу, що наведені зауваження не стосуються принципових положень і результатів дисертації, тому не знижують її наукову і практичну цінність.

Загальні висновки опонента по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Шиманюка Павла Вячеславовича на тему «Короткострокове прогнозування вузлових електричних навантажень в розподільних мережах» є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, направлені на вирішення актуальної науково-практичної задачі із розроблення методів та способів забезпечення достатньої точності короткострокового прогнозування вузлових навантажень розподільних електричних мереж та зниження комерційних витрат операторів систем розподілу, пов'язаних з операціями на балансуєчому ринку електричної енергії.

За змістом та отриманими достовірними науковими результатами дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеню доктора філософії» затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року №44, а її автор – **Шиманюк Павло Вячеславович** заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент, кандидат технічних наук,
доцент кафедри електричних мереж та систем
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

