

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертацію **Мірошника Володимира Олександровича** на тему «**Короткострокове прогнозування електричного навантаження енергосистем з використанням штучних нейронних мереж глибокого навчання**», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

Актуальність теми дисертації. Для планування режимів роботи електроенергетичних систем (ЕЕС) необхідним є прогнозування значення споживання електричної енергії. З впровадженням балансуючого ринку електроенергії зростає необхідність короткострокового прогнозу сумарного електричного навантаження (СЕН), включно до погодинного споживання на наступну добу. Суттєве ускладнення у вирішенні проблеми прогнозування СЕН внесли відновлювані джерела електроенергії (ВДЕ), генерування яких є нестабільним і відбувається воно в розподільних електричних мережах, тобто паралельно з навантаженням. Тут йдеться вже про прогнозування двох взаємозв'язаних ймовірнісних процесів – генерування і споживання електроенергії, які залежать від різних факторів.

Нерозривність процесів генерування і споживання та значна обмеженість засобів для накопичення електроенергії в енергосистемах України робить особливо актуальною є задачу підвищення точності короткострокових прогнозів, оскільки завищена оцінка навантаження призведе до додаткових фінансових витрат, неефективного розподілу первинних енергоносіїв та зменшення ресурсу енергоагрегатів, а його недооцінка може бути пов'язана з значними збитками через зниження надійності електропостачання та необхідність використання дорогих маневрових електростанцій, потужності яких на сьогодні не вистачає. Метою дисертаційної роботи Мірошника В.О. є вдосконалення математичних моделей, методів та засобів для підвищення точності та надійності результатів короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження енергосистеми з суттєвою часткою енергоємних підприємств та відновлюваних джерел енергії, що і визначає її актуальність.

Результати, що сприяють досягненню поставленої мети, автор отримав, виконуючи дослідження в рамках науково-дослідних робіт, що виконувалися в Інституту електродинаміки НАН України. Дослідження, у яких здобувач брав участь, здійснювались при виконанні наступних планових науково-дослідних робіт: «Розробка методики і програмного комплексу ретроспективного аналізу, статистичної обробки та адаптивного короткострокового прогнозування добових графіків сумарного електричного навантаження енергопостачальних компаній», (№ ДР 0116U006639); «Розвиток засобів комп'ютерного моделювання ЕЕС для оперативного та короткострокового прогнозування навантаження та рівня стійкості ОЕС України» (№ ДР 0115U005309); «Створення науково-технічних основ інтелектуалізації технологічних процесів та засобів вимірювання, керування, моніторингу і діагностування в електроенергетичних та електротехнічних системах», шифр «Інтехен» (№ ДР 0118U005367).

Короткий аналіз змісту дисертації і відповідність його поставленим задачам. В *першому розділі* розглянуто класифікацію видів прогнозування сумарного електричного навантаження в електроенергетиці. Обґрунтовано актуальність короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження в умовах ринку електроенергії. Узагальнено стратегію підвищення точності прогнозів. Проаналізовано основні сучасні моделі для прогнозування СЕН, які використовуються у вітчизняних та зарубіжних роботах.

З аналізу літературних джерел виявлено, що незважаючи на значний розвиток математичних методів інтелектуального аналізу даних, їх застосування для розв'язання задачі короткострокового прогнозування електричного навантаження є досить обмеженим. В той же час, підвищення рівня автоматизації енергосистем, втілення ідей концепції Smart Grid на практиці, підвищення кількості просьюмерів вимагає ускладнення інструментів аналізу даних та прогнозування. Аналіз теоретичної основи задачі прогнозування електричного навантаження дозволив виділити причини похибок та сформувані стратегії підвищення якості результатів прогнозування.

Другий розділ присвячено аналізу впливу зовнішніх факторів (календарних, метеорологічних, астрономічних, технологічних) на СЕН. Досліджено вплив похибки прогнозу температури на похибку прогнозу СЕН. Вдосконалено метод прогнозування СЕН з врахуванням режимів роботи енергоємних підприємств. Досліджено вплив зміни структури навантаження енергосистеми протягом року на точність короткострокових прогнозів.

Показано, що при прогнозуванні сумарного електричного навантаження електроенергетичної системи ОЕС України за робочі та вихідні дні модель на основі штучної нейронної моделі (ШНМ) максимально наближається за точністю та стабільністю результатів до адитивної математичної моделі (АММ) сумарного електричного навантаження. Наявність в СЕН енергосистеми складової, для якої відсутній значущий вплив метеорологічних факторів та тижневої періодичності, призводить до викривлення моделі впливу цих факторів на СЕН загалом. Побудова окремих моделей для навантаження енергоємних підприємств та решти навантаження енергосистеми дає змогу підвищити точність та стабільність короткострокових прогнозів. Під впливом зміни режиму електроспоживання в енергосистемі протягом року суттєво змінюється склад навантаження, що призводить до зміни характеристики залежності СЕН від метеорологічних та астрономічних факторів. При цьому для підвищення точності короткострокового прогнозування необхідно вводити додаткову вхідну інформацію та використовувати більш складний апарат штучних нейронних мереж.

В третьому розділі виконано аналіз особливостей аномальних значень, які зустрічаються в часових рядах електричного навантаження, та вдосконалено алгоритм їх виявлення та заміни. Досліджено можливість використання даних багаторічної передісторії для підвищення точності короткострокових прогнозів.

Показано, що використання даних довготривалої передісторії дозволяє сформулювати статистично значиму вибірку для графіків електричного навантаження нерегулярних днів. Запропоновано підхід до вирішення проблеми малої кількості статистичних даних для моделювання СЕН у такі дні шляхом пошуку подібних добових графіків з урахуванням змінного вагового коефіцієнту при погодинних значеннях навантаження. Наявність в ретроспективних даних одиночних та групових аномальних значень призводить до викривлення моделі зв'язку між навантаженням та зовнішніми факторами, що є однією з причин виникнення похибок прогнозу.

В *четвертому розділі* розроблено архітектуру штучної нейронної мережі глибокого навчання для короткострокового прогнозування ЕН – *eResNet*. Досліджено залежність похибки прогнозу від кількості даних для навчання нейронної мережі, проведено порівняльний аналіз точності прогнозування *eResNet* та багатошарового персептрону, вдосконалено метод однофакторного прогнозування обсягів відпуску електричної енергії електростанціями з ВДЕ за рахунок застосування розробленої нейронної мережі глибокого навчання.

Показано, що на основі наведених результатів запропонована архітектура штучної нейронної мережі глибокого навчання *eResNet* здатна робити точніші прогнози, ніж багатошаровий персептрон при наявності достатньої кількості даних. Підвищення точності пов'язано виключно з наявністю більшої кількості шарів та використанням обхідних з'єднань. Для обох нейронних мереж збільшення навчальної вибірки до певного розміру призводить до зменшення похибки, після чого спостерігається ефект насичення. Комбінування декількох моделей показало додаткове підвищення якості прогнозів. Запропонована модель дозволяє побудувати прогнозні інтервали з ймовірністю потрапляння фактичних значень в межі інтервалу близькою до цільових значень, ефективність прогнозного інтервалу на рівні 0,82 при очікуваних значеннях 0,8.

Таким чином, Мірошник В.О., провівши сукупність наукових досліджень, спираючись на сучасні методи досліджень і технічні засоби, розв'язав поставлені ним задачі і досяг поставлену в роботі мету – удосконалив метод, розробив моделі та засоби для підвищення точності та надійності результатів короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження енергосистеми з суттєвою часткою енергоємних підприємств та відновлюваних джерел енергії.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність і новизна. В дисертації Мірошник В.О. отримав такі результати, які мають суттєву наукову новизну:

- вперше на основі штучної нейронної мережі глибокого навчання розроблено модель багатофакторного короткострокового прогнозування електричного навантаження енергосистем;

- отримав подальший розвиток метод короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження енергосистеми зі значною часткою енергоємних виробництв;

- удосконалено метод виявлення і заміни аномальних значень в даних сумарного електричного навантаження енергосистеми та енергоємних виробництв, а також метод однофакторного короткострокового прогнозування відпуску електричної енергії електростанціями з відновлюваними джерелами енергії.

Положення і висновки відносно суті проблеми, принципів і методів побудови математичних моделей в роботі обґрунтовані та базуються на законах електротехніки, теорії електричних кіл і методах математичного моделювання. Висновки по розділах і по роботі в цілому відповідають змісту дисертації і є об'єктивними. Можна стверджувати, що наведені в дисертаційній роботі Мірошника В.О. висновки і рекомендації щодо використання результатів досліджень достатньо обґрунтовані та відповідають дійсності. Достовірність їх забезпечена коректністю використання математичного апарату, наукових положень та результатів експерименту.

Основні результати дослідження **достатньо апробовані**. Вони доповідались на науково-технічних конференціях і опубліковані в 14-ти роботах, зокрема 11 у фахових виданнях України, з яких 3 статті включено до міжнародної науко метричної бази Scopus, 2 тези доповідей у збірниках матеріалів конференцій та авторське свідоцтво на комп'ютерну програму, 1 розділ монографії. Аналіз публікацій дозволяє зробити висновок, що в них в повному обсязі опубліковані матеріали дисертації. Автореферат дисертації відображає її зміст, ідеї та висновки. У авторефераті розкрито внесок дисертанта в даний науковий напрям, розкриті новизна розробок, теоретичні і практичні значення результатів проведених досліджень.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що розроблено архітектуру штучної нейронної мережі глибокого навчання, яка реалізована у вигляді програми і дозволяє підвищити точність та стабільність короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження. Розроблено рекомендації щодо підвищення точності та стабільності короткострокового прогнозування обсягів відпуску електричної енергії електростанціями з ВДЕ з застосуванням розробленої штучної нейронної мережі глибокого навчання. Результати роботи використано для вдосконалення прогнозування сумарного обсягу відпуску виробниками з ВДЕ для Державного підприємства «Енергоринок». Розроблено рекомендації щодо вдосконалення методики розрахунку похибки прогнозування обсягів відпуску електричної енергії виробниками з ВДЕ для Міненерго. В навчальному процесі результати дисертації використовуються під час викладання дисциплін з підготовки магістрів наукового та професійного спрямування за спеціальностями 144 «Теплоенергетика» та 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Інституті енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. І. Сікорського».

Результати дисертаційної роботи можуть бути використані в організаціях, які займаються дослідженнями та розробкою методів і засобів

прогнозування електричного навантаження електроенергетичних систем (НЕК «Укренерго», Гарантований покупець, ДП «Енергоринок»).

Зауваження по роботі.

1. В першому розділі є надлишкова інформація, яку можна було б скоротити, замінивши посиланнями на доступні джерела, наприклад, щодо розрахунку показників якості прогнозу.

2. В роботі наводяться оцінки вартості похибки короткострокових прогнозів навантаження для ринків США та ЄС. Чи проводились подібні оцінки для оптового ринку електричної енергії України?

3. В розділі 2 (с. 53) використовується словосполучення «кліматичні фактори», що є не коректним, більш влучним є термін «метеорологічні фактори».

4. В розділі 2 (с. 58) не наведено опис позначень в формулі 2.6, що не дозволяє оцінити коректність розрахунку астрономічної складової СЕН.

5. В розділі 3 вказується на необхідність виявлення та заміни аномальних значень електричного навантаження при надходженні нових даних, проте не розглянуто особливості даної задачі.

6. В розділ 4 недостатньо чітко сформовано особливості та переваги штучних нейронних мереж глибокого навчання порівняно з класичними нейронними мережами.

7. В розділі 4 вказано, що розробка та вдосконалення спеціалізованої архітектури штучної нейронної мережі дасть можливість суттєво покращити результати прогнозування, що є недостатньо обґрунтованим.

8. Щодо загальної оцінки змісту, структури та оформлення результатів роботи. У висновках до розділів автор часом наводить загальновідомі положення, що є недоцільним. У роботі зустрічаються граматичні помилки, стилістичні неточності та описки, але кількість їх допустима, окремі рисунки нагромаджені, що ускладнює сприйняття представлених даних, наприклад рис. 3.2.

Зазначені зауваження не є принциповими і такими, що піддають сумніву результати досліджень. Вони не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи Мірошника В.О.

Висновки

Зміст дисертації Мірошника Володимира Олександровича відповідає спеціальності 05.14.02, за якою вона представлена до захисту. Дисертаційна робота має значну наукову цінність, є закінченою науково-дослідною роботою, яка присвячена вирішенню важливої і складної проблеми для електроенергетики – підвищення точності та надійності результатів короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження енергосистеми з суттєвою часткою енергоємних підприємств та відновлюваних джерел енергії.

Дисертаційна робота за актуальністю теми, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, новизною досліджень і практичною

цінністю отриманих результатів відповідає вимогам п.п. 9, 11, 12 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 24 липня 2013 р. № 567 (зі змінами, затвердженими Постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 р., № 656). Її автор, Мірошник Володимир Олександрович, заслуговує присудження йому наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Завідувач кафедри електричних станцій та систем
Вінницького національного технічного університету,
доктор технічних наук, професор



[Handwritten signature]

Петро ЛЕЖНЮК

Підпис *[Handwritten signature]*
ПОСВІДЧУЮ
Зав. канцелярією *[Handwritten signature]*

Поея. до СВР
25.08.21р
[Handwritten initials]