

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
Сичової Вікторії Володимирівни
«Короткострокове прогнозування небалансів електричної енергії
в ОЕС України»,

що подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії з галузі знань
14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»

Актуальність теми дисертації.

Необхідність вирішення задач короткострокового прогнозування сумарних небалансів електричної енергії та споживання в Об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України обумовлена сучасним станом та перспективами розвитку ринку електроенергії. Балансуючий ринок відіграє ключову роль у забезпеченні стабільності та надійності функціонування ОЕС, оскільки в його межах здійснюється балансування сумарного виробництва та споживання електричної енергії на основі конкурентних механізмів ціноутворення.

Важливість цих задач зростає в умовах змін у структурі генерації та споживання, що були спричинені військовими діями та пов'язаними з ними руйнуваннями. Зокрема, значне зменшення маневрових потужностей та збільшення частки непередбачуваних джерел енергії, таких як вітрові та сонячні станції, створюють нові виклики для забезпечення надійності функціонування енергосистеми.

Це обумовлює **актуальність** задач короткострокового прогнозування сумарних небалансів електричної енергії та споживання в ОЕС України, адже їх вирішення дозволяє підвищити ефективність вибору ресурсів для покриття споживання та балансування ОЕС України, що є важливою складовою забезпечення стійкої та надійної її роботи.

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень.

Результати, отримані в процесі дисертаційного дослідження, мають таку наукову новизну:

1. Запропоновано спосіб визначення меж «зони нечутливості» електричного навантаження до температури повітря довкілля на основі застосування перетворення Гільберта-Хуанга для декомпозиції відповідних часових рядів, що зумовило збільшення коефіцієнта кореляції між

температурною складовою електричного навантаження та температурою повітря і, відповідно, призвело до підвищення надійності виділення температурної складової електричного навантаження.

2. Розроблено гібридну модель для короткострокового прогнозування електричного навантаження, в якій для прогнозування базової складової використано рекурентну штучну нейронну мережу (ШНМ) LSTM, а для складової, що відображає вплив температури повітря на навантаження, використано поліноміальні регресійні залежності для кожного годинного профілю, що у порівнянні з досліджуваними моделями підвищило точність короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження в середньому на 25%.

3. Розроблено модель короткострокового прогнозування обсягів позитивних (профіцит) та негативних (дефіцит) небалансів електричної енергії в ОЕС України на нейромережевому базисі, у вигляді трьох ШНМ LSTM з різними довжинами вікна та кількістю нейронів прихованого шару. Для прогнозування часового ряду позитивних небалансів ШНМ об'єднано в ансамбль. Використання розроблених моделей забезпечує зменшення похибки прогнозу небалансів електричної енергії у порівнянні з методами прогнозування на основі авторегресійних моделей в середньому на 22% для позитивних небалансів електроенергії та на 81% – для негативних.

4. Розроблено новий метод однофакторного короткострокового прогнозування обсягу попиту на послугу балансування на основі байєсової ШНМ, яка крім найімовірнішого значення обсягу попиту на послугу балансування також дає змогу оцінювати із заданою наперед ймовірністю максимальні відхилення обсягу попиту від прогнозованого значення. На відміну від інших методів оцінювання таких максимальних відхилень, байєсова ШНМ враховує наявність «шуму» в даних, що забезпечує точнішу оцінку максимальних відхилень обсягу попиту від прогнозованого значення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами.

Тематика та розділи цієї дисертації входили до складу наукових робіт, які були виконані в Інституті електродинаміки НАН України. Результати

досліджень здобувачки отримані в процесі виконання наукових робіт:

- 1) «Розвиток засобів комп'ютерного моделювання ЕЕС для оперативного та короткострокового прогнозування навантаження та рівня стійкості ОЕС України» (2016-2020 рр., №ДР 0115U005309);
- 2) «Науково-технічні засади розвитку та керованості сегменту розосереджених джерел енергії в структурі генерувальних потужностей електроенергетичних систем» (2018-2022 рр., №ДР 0117U007711);
- 3) «Науково-технічні засади відновлення та керованості електроенергетичної системи України в повоєнний період за синхронної роботи з енергооб'єднанням країн континентальної Європи» (ENTSO-E) (2023-2027 рр., №ДР 0123U100709);
- 4) «Прогнозування сумарного небалансу електричної енергії в ОЕС України та його вплив на кінцеву вартість електричної енергії» (2021-2022 рр., №ДР 0121U111848);
- 5) «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E» (2023-2024 рр., №ДР 0123U10076);
- 6) «Моделі і засоби підвищення ефективності роботи гідро- та гідроакumuлюючих електростанцій для балансування ОЕС України в умовах ринку електричної енергії та особливих технологічних обмежень» (2023-2024 рр., №ДР 0123U103734).

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувачки.

Наукові положення та висновки, що містяться в дисертаційній роботі, є теоретично обґрунтованими та підтвердженими проведенням моделюванням під час виконання науково-дослідних робіт, апробацією на наукових міжнародних конференціях і наукових семінарах.

Представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Зміст дисертації, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають темі роботи.

Представлена робота відповідає принципам академічної доброчесності, а саме: відтворення в тексті наукової роботи результатів дослідження інших науковців наведено з посиланнями, що не порушує Закон України «Про

авторське право і суміжні права»; адекватність та точність наведеної інформації (без спотворення) із цитуванням з іноземних джерел.

Наукове значення та практична цінність.

Полягає в тому, що на підставі виконаних досліджень запропоноване комплексне рішення актуальної науково-технічної задачі короткострокового прогнозування погодинних значень позитивних і негативних небалансів електричної енергії та, супутньо – добових графіків сумарного електричного навантаження та обсягу попиту на послугу балансування.

За результатами виконаних досліджень розроблено засоби прогнозування добових графіків сумарного електричного навантаження та небалансів електричної енергії у вигляді відповідних комп'ютерних програм та розроблено комп'ютерну програму «Модель розрахунку цін та тарифів на електричну енергію», яка призначена для розрахунку цін та тарифів на електроенергію залежно від типу закупівлі електроенергії та дозволяє здійснювати порівняння різних стратегій участі на ринку.

Також, матеріали дисертаційної роботи використано для підготовки методично-навчальних матеріалів, призначених для проведення лекційних та практичних занять з дисципліни «Системи ринків електричної енергії» в процесі підготовки магістрів зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» в Навчально-науковому інституті енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського".

В межах виконання роботи опрацьовано та здійснено підготовку до прийняття як національного міжнародного стандарту IEC 62325-451-7:2021 Framework for energy market communications – Part 451-7: Balancing processes, contextual and assembly models for European style market (Інфраструктура комунікацій на енергетичному ринку. Частина 451-7: Врегулювання небалансів, контекстна та збірна моделі для Європейського ринку).

Складові роботи отримані внаслідок участі здобувачки у виконанні науково-дослідних робіт Інституту електродинаміки НАН України.

За результатами роботи було впроваджено в дослідну експлуатацію в ТОВ «НОВІ ЕНЕРГЕТИЧНІ ПРОЕКТИ» комп'ютерну програму «Модель розрахунку вартості електричної енергії споживачами».

Оцінка публікацій здобувачки.

Викладені в дисертаційній роботі результати дослідження отримали достатній рівень апробації. За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 24 наукові праці, серед яких 3 розділи монографії, 9 статей у

наукових фахових виданнях, 3 свідоцтва про авторське право на твір, 9 тез доповідей в збірках тез науково-технічних конференцій.

Структура та зміст дисертації.

Структура дисертації побудована відповідно до мети та задач дослідження. Викладення основного матеріалу дисертації, наукових положень, результатів та висновків логічне та аргументоване. Дисертація написана в науковому стилі та оформлена відповідно до чинних умов.

Дисертаційна робота Сичової В. В. викладена на 213 сторінках, складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Обсяг основного тексту дисертації складає 158 сторінок друкованого тексту. Робота ілюстрована 28 (34 з додатками) таблицями та 34 (81 з додатками) рисунками. Список використаних джерел містить 109 найменувань, із них 42 кирилицею та 67 латиницею.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дослідження, зазначено зв'язок з науковими програмами, сформульовані мета і завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, викладені наукова новизна і практичне значення отриманих результатів, наведено особистий внесок здобувачки, публікації та апробацію наукових результатів.

У **першому розділі** окреслено задачі прогнозування в умовах функціонування сучасної моделі ринку електричної енергії України та проведено літературний огляд за темою дослідження. За результатами виконаного аналізу визначено основні задачі дослідження, що полягають у розробці ефективних моделей прогнозування сумарного електричного навантаження із урахуванням зовнішніх факторів, розробці та дослідженні моделей прогнозування сумарних небалансів електроенергії, а також обсягу попиту на послугу балансування на основі штучних нейронних мереж, зокрема і з використанням ймовірнісних ШНМ.

Другий розділ присвячено побудові моделей короткострокового прогнозування добових графіків сумарного електричного навантаження з урахуванням впливу температури повітря довкілля. Запропоновано спосіб декомпозиції графіків передісторії на основі перетворень Гільберта-Хуанга, що дозволив підвищити надійність виділення температурної складової електричного навантаження. На основі проведених досліджень розроблено гібридну модель короткострокового прогнозування добових графіків сумарного електричного навантаження, яка містить в собі попередню декомпозицію графіків передісторії на температурну та базову складові та їх прогнозування із застосуванням поліноміальної регресії та ШНМ LSTM відповідно.

У **третьому розділі** висвітлено результати ретельного аналізу часових рядів небалансів електроенергії та обсягу попиту на послугу балансування, що свідчать про нестаціонарність та високу варіативність досліджуваних часових рядів. Визначено типи моделей для прогнозування: авторегресійні та ШНМ LSTM – для небалансів електроенергії, ймовірнісні та генеративно-змагальні ШНМ – для обсягу попиту на послугу балансування. Крім того, на основі проведених досліджень розроблено модель, яка здійснює прогнозування небалансів електроенергії за допомогою нейромереж LSTM та їх ансамблів.

У **четвертому розділі** наведено результати випробування запропонованих моделей для прогнозування небалансів електричної енергії та обсягу попиту на послугу балансування. Доведено доцільність застосування для короткострокового прогнозування небалансів електроенергії моделі на основі ШНМ LSTM та їх ансамблів задля підвищення точності результатів прогнозування. Показано, що застосування ймовірнісних нейронних мереж для прогнозування обсягу попиту на послугу балансування дозволяє забезпечити точність результатів завдяки своїм характерним особливостям, що відповідають задачі прогнозування із високою невизначеністю.

Також, наведено опис розроблених комп'ютерних програм «Прогнозування добових графіків сумарного електричного навантаження», «Прогнозування добових графіків сумарних небалансів електроенергії» та «Модель розрахунку цін та тарифів на електричну енергію».

Висновки по дисертаційній роботі підкреслюють наукову новизну та практичну цінність проведених досліджень.

Список використаної літератури із 109 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та закордонні публікації за темою дисертаційних досліджень.

Додатки до дисертаційної роботи містять акти впровадження результатів дисертаційної роботи, авторські свідоцтва на комп'ютерні програми, список публікацій та ілюстративні матеріали.

Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Матеріал дисертації викладено логічно і обґрунтовано, усі розділи мають свою специфіку, котра у сукупності свідчить про цілісність та завершеність дисертаційної роботи. Таким чином, представлена дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, яка написана науковою мовою. Зміст, структура, послідовність та повнота розв'язаних задач цілком відповідають як темі роботи, так і затвердженим вимогам до написання дисертаційних досліджень МОН України.

Зауваження.

1. У роботі наведена надлишкова інформація (теоретичні відомості, опис метрик для оцінювання якості прогнозів), яку доцільно було б скоротити, замінивши на посилання на доступні джерела.

2. У роботі відсутнє обґрунтування врахування лише температури повітря як зовнішнього чинника при прогнозуванні електричного навантаження.

3. У роботі представлені результати прогнозування електричного навантаження за даними лише АК «Київенерго», що не дає підстав гарантувати аналогічну точність прогнозування при застосуванні моделі на даних інших енергетичних компаній.

4. У роботі однаковий термін «сумарні небаланси електроенергії» використовується як для позначення загальних небалансів в ОЕС, так і для означення суми позитивних і негативних небалансів, що може спричинити неоднозначність у трактуванні.

5. В описі результатів прогнозування обсягу попиту на послугу балансування відсутнє обґрунтування вибору горизонту прогнозування.

6. З тексту роботи не зрозуміло, як у розроблених моделях враховуються особливі дні, такі як свята, які мають відому циклічність і суттєво впливають на споживання електроенергії.

7. У тексті дисертації зустрічаються незначні синтаксичні та стилістичні помилки, наприклад, на с. 90: "навантаження в найкращого прогнозний день", або емоційні вирази, як-от на с. 48: «чудові результати».

Наведені вище зауваження стосуються окремих складових дисертаційної роботи та не знижують наукову і практичну цінність результатів роботи та її загальну позитивну оцінку.

Загальний висновок опонента по дисертаційній роботі.

Детальний аналіз матеріалу дисертаційної роботи та опублікованих наукових праць дає змогу стверджувати, що дисертаційна робота Сичової Вікторії Володимирівни «Короткострокове прогнозування небалансів електричної енергії в ОЕС України» містить усі ознаки завершеної наукової роботи. В ній отримано нові науково обґрунтовані теоретичні та науково-практичні результати, що дають змогу підвищити показники ефективності роботи оператора системи розподілу.

Дисертаційна робота Сичової В.В. є самостійно виконаним науковим дослідженням. Матеріал дисертації викладено послідовно, стиль викладання доказовий, чіткий і лаконічний. Висновки до кожного розділу дисертації в цілому тісно пов'язані з її змістом і відображають суть виконаних досліджень.

Публікації авторки повністю висвітлюють наукові положення і результати її наукових досліджень.

Враховуючи актуальність теми дисертаційної роботи, а також отримані достовірні наукові результати, що мають наукову і практичну значимість, та, враховуючи достатню повноту висвітлення основних положень дисертаційної роботи в опублікованих працях, вважаю, що представлена дисертаційна робота відповідає вимогам «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 року № 44, а її авторка Сичова Вікторія Володимирівна заслуговує присудження наукового ступеня доктора філософії зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Офіційний опонент

кандидат технічних наук,
старший дослідник,
провідний науковий співробітник
відділу прогнозування розвитку
електроенергетичного комплексу
Інституту загальної енергетики
НАН України

Олександр ЗГУРОВЕЦЬ

