

ВІДГУК

офіційного опонента на дисертаційну роботу
СИЧОВОЇ Вікторії Володимирівни

“Короткострокове прогнозування небалансів електричної енергії в ОЕС України”,

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

Актуальність теми дисертації.

Нині розв’язання задач прогнозування небалансів електричної енергії є важливим через сучасний стан та перспективи розвитку Об’єднаної енергетичної системи (ОЕС) України та ринку електричної енергії, включаючи його окремі сегменти. Складність цієї задачі обумовлена нестаціонарністю та високою варіативністю процесу, відсутністю достатньої інформації щодо впливу зовнішніх чинників. Одним з факторів варіативності є наявність відновлюваних джерел енергії негарантованої потужності, що впливає на загальний баланс. Крім того, виникає необхідність у паралельному вирішенні задач прогнозування електричного навантаження енергосистеми та обсягу попиту на послугу балансування. Вирішення цих задач дозволяє оптимізувати вибір ресурсів для покриття споживання та підтримання балансу в ОЕС України, що є критично важливим для забезпечення її стабільної та надійної роботи. До перспективних підходів для забезпечення достатньої точності прогнозування в означених задачах відносяться методи авторегресії, застосування штучних нейронних мереж з різними властивостями.

Все це обумовлює актуальність дисертаційного дослідження Вікторії Сичової, яке присвячене розв’язанню **актуальної** науково-технічної задачі короткострокового прогнозування небалансів електричної енергії з використанням штучних нейронних мереж глибинного навчання та інших сучасних методів прогнозування.

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 ОЕС України» (шифр: «Система-6») 2016-2020 рр. № ДР 0115U005309; «Науково-технічні засади розвитку та керованості сегменту розосереджених джерел енергії в структурі генерувальних потужностей електроенергетичних систем» (шифр: «СЕГ-

МЕНТ») 2018-2022 рр. № ДР 0117U007711; «Науково-технічні засади відновлення та керованості електроенергетичної системи України в повоєнний період за синхронної роботи з енергооб'єднанням країн континентальної Європи» (ENTSO-E) (шифр: ФЕНІКС). 2023-2027 рр. №ДР 0123U100709. «Прогнозування сумарного небалансу електричної енергії в ОЕС України та його вплив на кінцеву вартість електричної енергії» (шифр: «НЕБАЛАНС») 2021-2022 рр. №ДР 0121U111848; «Забезпечення стійкості та надійності національної електроенергетики в умовах синхронної роботи ОЕС України з континентальною європейською енергетичною системою ENTSO-E» (шифр: РЕЖИМ-2). 2023-2024 рр. №ДР 0123U10076. В зазначених роботах здобувачки приймала участь як виконавиця.

Новизна представлених теоретичних та/або експериментальних результатів проведених здобувачем досліджень

Результати виконання дисертаційного дослідження містять наукову новизну, зокрема вдосконалення існуючих методів прогнозування та розроблення нових моделей.

1. Застосовано декомпозицію часових рядів, які описують електричне навантаження, та запропоновано спосіб визначення меж зони нечутливості до температури повітря довкілля, що обумовило підвищення надійності виділення температурної складової електричного навантаження.

2. Розроблено гібридну модель для короткострокового прогнозування електричного навантаження, в якій розділено прогнозування базової складової за допомогою штучної нейронної мережі, та температурної складової з використанням регресійної залежності, що дозволило істотно підвищити точність короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження.

3. Розроблено модель короткострокового прогнозування обсягів позитивних (профіцит) та негативних (дефіцит) небалансів електричної енергії в ОЕС України з використанням різних варіантів штучних нейронних мереж, які за потреби об'єднуються в ансамбль. Це забезпечує зменшення похибки прогнозу небалансів електричної енергії у порівнянні з існуючими авторегресійними моделями (на 22% для позитивних небалансів електроенергії та на 81% – для негативних).

4. Розроблено новий метод однофакторного короткострокового прогнозування обсягу попиту на послугу балансування, який також дає змогу оцінювати із заданою наперед ймовірністю максимальні відхилення обсягу попиту від прогнозованого значення; запропоноване врахування «шуму» в даних забезпечує точнішу оцінку максимальних відхилень від прогнозованого значення.

Наукова обґрунтованість представлених результатів здобувачки

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

ною постановкою завдання, застосуванням апробованих сучасних методів аналізу часових рядів, математичної статистики, оптимізації, комп'ютерного моделювання, машинного навчання.

Досліди із прогнозування небалансів електроенергії, сумарного електричного навантаження та обсягу попиту на послугу балансування здійснено на відповідних фактичних ретроспективних даних, з тестовими завданнями та верифікацією результатів.

Практична цінність отриманих результатів

Практична цінність роботи полягає в тому, що на підставі результатів виконаних досліджень запропоновано розв'язання задачі забезпечення прийнятної точності короткострокового прогнозування небалансів електричної енергії в ОЕС України, що дає змогу ефективно оптимізувати використання ресурсів для балансування ОЕС України, мінімізувати витрати на закупівлю додаткової енергії та підвищити загальну стабільність і надійність функціонування енергосистеми.

Матеріали дисертаційної роботи використано для підготовки методично-навчальних матеріалів 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 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 в якості національного стандарту.

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

За результатами роботи було отримано три авторські свідоцтва та впроваджено в дослідну експлуатацію комп'ютерні програми «Модель розрахунку цін та тарифів на електричну енергію», «Модель розрахунку вартості електричної енергії споживачами».

Оцінка публікацій здобувачки

За результатами дисертаційного дослідження опубліковано 24 наукові роботи, серед яких 3 статті у складі колективних монографій, що проіндексовані в базі даних Scopus, 2 статті в періодичних виданнях категорії «А» з індексацією в базі даних Scopus, 5 статей у фахових виданнях України категорії «Б» та 3 авторських свідоцтва на комп'ютерну програму.

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

Основні результати дослідження достатньо апробовані. Вони доповідались здобувачкою та обговорювались на 11 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.

Таким чином, наукові результати, описані в дисертаційній роботі, повністю висвітлені у наукових публікаціях здобувачки.

Структура та зміст дисертації

Дисертаційна робота Вікторії Сичової складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи – 213 сторінок. Основний зміст викладено на 158 сторінках друкованого тексту. Робота проілюстрована 28 таблицями (34 з додатками), 34 рисунками (81 з додатками). Список використаних джерел містить 109 найменувань, з них 42 кирилицею та 67 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 здобувачки 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 наявних розробок в галузі прогнозування в електроенергетиці. За результатами визначено основні завдання дослідження.

У другому розділі представлено розв'язання задачі короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження з урахуванням зовнішнього фактора – температури повітря довкілля, на основі декомпозиції даних. Запропоновано спосіб декомпозиції графіків електричного навантаження на складові та на його основі побудовано гібридну модель короткострокового прогнозування. Представлено результати випробування запропонованої моделі.

В третьому розділі представлено результати аналізу часових рядів, що відображають позитивний та негативний небаланси електричної енергії та обсяг попиту на послугу балансування. Запропоновано шляхи їх прогнозування, зокрема запропоновано модель на основі ансамблів нейронних мереж LSTM для прогнозування небалансів електричної енергії та модель на основі ймовірнісної нейронної мережі для прогнозування обсягу попиту на послугу балансування.

У четвертому розділі дисертації представлено результати короткострокового прогнозування добових графіків небалансів електричної енергії та обсягу попиту на послугу балансування за допомогою розроблених моделей, описаних

у Розділі 3, що засвідчують їхню ефективність. Додатково наведено опис комп'ютерних програм, побудованих на основі проведених досліджень.

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

Список використаної літератури із 109 найменувань охоплює сучасні вітчизняні та зарубіжні публікації за темою дисертаційного дослідження.

В *додатках* до дисертаційної роботи наведено список публікацій авторки, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, авторські свідоцтва на комп'ютерні програми та ілюстрації до тексту дисертації.

Розділи дисертації логічно пов'язані між собою і є цілісним дослідженням, відповідно до визначеної мети та завдань. Дисертація написана з використанням сучасної наукової термінології та оформлена відповідно до чинних вимог.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

1. Дисертаційне дослідження базується на використанні статистичних методів для аналізу часових рядів, тобто виконується реаналіз наявних історичних даних спостережень за різними факторами. Однак серед факторів впливу виокремлено температуру навколишнього повітря, а також генерацію залежними від погоди відновлюваними джерелами енергії; щодо прогнозування цих факторів у метеорології використовуються також фізичні методи (NWP-моделі), а результати прогнозування оприлюднюються. Застосування лише статистичних методів обмежує практичну цінність пропонованих підходів.

2. Для оцінки кореляції з ВДЕ (рис. 3.1 і 3.2) не уточнено склад відновлюваної генерації, хоча в подальшому підкреслюється вплив вітрової та сонячної потужностей як негарантованих; однак діючий (досліджений) склад відновлюваної генерації містить переважну частку гідроенергетики, яка є контрольованою.

3. У висновках до розд. 3 рекомендовано використання прогнозів ВДЕ як регресора, хоча в самому розділі відзначено незначний їх вплив (слабку кореляцію з небалансами), пояснень цьому не наведено.

4. У п. 4.1.2 (табл. 4.2, 4.3) відзначено, що комбіновані моделі дають більшу похибку ніж однофакторні; натомість у висновку до п. 4.1 зазначено, що об'єднання моделей із різними характеристиками і гіперпараметрами сприяє підвищенню надійності й стабільності результатів прогнозування (до речі, цю думку поділяють багато дослідників, наприклад проект ANEMOS щодо оцінки точності прогнозування ВДЕ). Пояснень цьому не наведено.

5. В якості вдосконалення моделі ШНМ LSTM вказано вибір значень гіперпараметрів моделі, які в табл. 4.7 названо оптимальними; при цьому не пояснено метод пошуку оптимальних значень та підтвердження оптимальності.

6. В роботі зустрічаються певні технічні невідповідності, наприклад:
- в табл. 2.5 невірне позначення стовпчика – має бути $\Sigma 2$;

- до табл. 2.7 не пояснено зміст наведених коефіцієнтів, там є посилання на неіснуючу формулу (1.18);

- у п. 2.5 пропонується змінений метод Гільберта-Хуанга, коли застосовано лише обвідну локальних мінімумів; нема пояснення щодо можливості такого використання, адже за означенням метод потребує також обвідної максимумів;

- п. 3.1.1 переобтяжений викладенням класичних понять математичної статистики; у п. 3.2.2 також багато уваги опису стандартизованого програмного забезпечення, але не акцентовано власний вклад у вдосконалення існуючих засобів;

- формули (4.2) та (4.3) для оцінки похибок записано з помилками (імовірно з опечатками);

- зазначення показників похибки прогнозу з точністю до сотих часток відсотка видається надмірним, адже може стосуватися лише конкретних випадків.

7. Викладення матеріалу в цілому чітке та стилістично виважене, однак присутня певна кількість орфографічних та синтаксичних помилок, що загалом не впливає на розуміння матеріалу.

Вважаю, що висловлені зауваження не стосуються принципів положень і результатів дисертації, мають переважно рекомендаційний характер і не применшують загальну наукову та практичну значимість.

Загальні висновки опонента по дисертаційній роботі

Дисертаційна робота Сичової Вікторії Володимирівни на тему «Короткострокове прогнозування небалансів електричної енергії в ОЕС України» 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 добових графіків небалансів електричної енергії.

За актуальністю обраної теми, обсягом та рівнем виконаних досліджень, практичною цінністю та науковою новизною дисертаційна робота відповідає вимогам «Порядку присудження ступеню 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 за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, старший науковий співробітник,
заступник директора
Інституту відновлюваної енергетики
НАН України



Микола КУЗНЕЦОВ