

## РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу **Сичової Вікторії Володимирівни** «Короткострокове прогнозування небалансів електричної енергії в ОЕС України», яка подана на здобуття наукового ступеня доктора філософії в галузі знань 14 «Електрична інженерія» за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

### **Актуальність дослідження.**

Дисертаційна робота В.В. Сичової присвячена розв'язанню важливої та актуальної задачі – розробці моделей короткострокового прогнозування добових графіків небалансів електричної енергії в ОЕС України, а також навантаження енергосистеми та обсягів попиту на послугу балансування. Прогнозування зазначених параметрів має важливе значення для ефективного функціонування ринку електроенергії. Точні прогнози дозволяють забезпечити надійність енергопостачання, оптимізувати використання ресурсів, знизити операційні витрати та мінімізувати ризики, що пов'язані з виникненням відповідних небалансів енергії. Прогнозування небалансів є актуальною задачею, розв'язання якої дозволяє забезпечити підтримання стійкої та надійної роботи енергосистем та їх об'єднань, що дає змогу оперативно реагувати на зміну режимних величин. Прогнозування сумарного електричного навантаження є ключовим для планування виробництва і розподілу електроенергії, що дозволяє уникнути перевантажень мережевих елементів та дефіциту енергії в пікові періоди. Крім того, точні прогнози обсягів попиту на послугу балансування сприяють ефективному управлінню балансувальними потужностями, що є критично важливим для підтримання енергетичної безпеки та економічної ефективності ринку електроенергії. Крім того, це також забезпечує конкурентні умови для учасників ринку та стимулює розвиток інновацій.

### **Наукова новизна.**

В дисертаційній роботі Сичовою В.В. запропоновано спосіб визначення меж «зони нечутливості» електричного навантаження до температури повітря довкілля на основі застосування перетворення Гільберта-Хуанга для декомпозиції відповідних часових рядів, що дало змогу визначити коефіцієнт кореляції між температурною складовою електричного навантаження та температурою повітря і, відповідно, дозволило виділити температурну складову електричного навантаження.

Розроблено гібридну модель для короткострокового прогнозування електричного навантаження, в якій для прогнозування базової складової використано рекурентну штучну нейронну мережу (ШНМ) Long Short-Term Memory (LSTM), а для складової, що визначає вплив температури повітря на навантаження, використано поліноміальні

регресійні залежності для кожного годинного профілю, що порівняно з досліджуваними моделями, дало змогу підвищити точність короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження.

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 у відповідну групу. Використання розроблених моделей дає змогу зменшити похибку прогнозу небалансів електричної енергії порівняно з методами прогнозування на основі авторегресійних моделей в середньому на 22% для позитивних небалансів електроенергії та на 81% – для негативних.

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.

### **Структура дисертаційної роботи.**

За своєю структурою дисертаційна робота Сичової В.В. складається з наступних частин: анотації, вступної частини, чотирьох розділів з висновками, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

У вступній частині наведено загальну інформацію про визначення теми дисертаційної роботи та її зв'язок з науковими темами. Авторкою сформульовано мету, об'єкт і предмет досліджень, сформовано наукову новизну, а також наведено відомості про публікації, особистий внесок здобувачки та викладено основні одержані результати.

В першому розділі представлено огляд задач прогнозування в електроенергетиці та публікацій, пов'язаних із особливостями застосування методів прогнозування для задач в галузі енергетики.

У другому розділі запропоновано моделі для короткострокового прогнозування сумарного електричного навантаження енергосистеми із урахуванням температури повітря довкілля на основі попередньої декомпозиції графіків передісторії. Для декомпозиції графіків ретроспективних даних щодо навантаження розроблено підхід на основі перетворень Гільберта-Хуанга, який забезпечує надійність виділення температурної складової. На основі цього підходу побудовано гібридну модель, що

містить модель поліноміальної регресії для прогнозування базової складової, та ШНМ LSTM – для температурної складової.

В третьому розділі представлено результати статистичного аналізу часових рядів позитивних й негативних небалансів електроенергії та обсягу попиту на послугу балансування при завантаженні та розвантаженні. На основі результатів цього аналізу запропоновано класи моделей для досліджуваних часових рядів, а саме: авторегресійні моделі та LSTM – для прогнозування небалансів електроенергії, ймовірнісні та генеративно-змагальні нейронні мережі – для прогнозування обсягу попиту на послугу балансування.

В четвертому розділі наведено результати прогнозування небалансів електричної енергії та обсягу попиту на послугу балансування. Представлено результати й доведено доцільність застосування розробленої в роботі моделі на основі групи нейронних мереж LSTM для прогнозування небалансів електроенергії. Крім того, ґрунтуючись на результатах експериментів, показано доцільність використання моделі на базі баєсових нейронних мереж для прогнозування обсягу попиту на послугу балансування, яка дає змогу оцінювати із заданою наперед ймовірністю максимальні відхилення обсягу попиту від прогнозованих значень.

Додатково наведено опис та представлено результати роботи розроблених програм: «Прогнозування добових графіків сумарного електричного навантаження», «Прогнозування добових графіків сумарних небалансів електроенергії» та «Модель розрахунку цін та тарифів на електричну енергію».

#### **Обґрунтованість та достовірність наукових положень дисертаційної роботи.**

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків та рекомендацій забезпечується шляхом застосування коректних методик постановки експериментів та обробки експериментальних даних, їх узгодження з теоретичними результатами і результатами моделювання. Результати виконання досліджень підтверджуються доповідями на міжнародних конференціях, публікаціями у фахових виданнях і авторськими свідоцтвами. Висновки дисертаційної роботи повні, логічні і відображають її сутність.

**Публікації та апробація результатів роботи здобувачки.** Основний зміст дисертаційної роботи Сичової В.В. достатньо повно представлено у 24 наукових працях, серед яких 3 - це розділи монографії, 9 статей у наукових фахових виданнях, 3 свідоцтва про авторське право на твір, 9 тез доповідей в збірках тез науково-технічних конференцій.

Результати теоретичних і експериментальних досліджень наведених у роботі отримані особисто або за безпосередньої участі авторки.

### **Практичне значення результатів роботи.**

Результати 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 в результаті 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».

### **Зауваження по дисертаційній роботі.**

1. В літературному огляді відсутні результати дослідження публікацій щодо прогнозування обсягу попиту на послугу балансування.
2. Не зовсім зрозуміло смислове навантаження п. 2.4. Про які давачі температури йде мова? Які їх технічні характеристики, зокрема, точність вимірювання? У тексті дисертації такі відомості відсутні, замість цього зазначається, що «...покази температури повітря  $D_4$  виявилися найбільш коректними та синхронізованими зі значеннями навантаження...».
3. В п. 2.6 зв'язок між електричним навантаженням та температурою повітря відображено в графічній формі, проте не наведено значення коефіцієнтів кореляції.
4. В роботі наявна надлишкова інформація, до прикладу в п. 2.7 забагато уваги приділено загальновідомим принципам роботи штучних нейронних мереж.
5. З тексту роботи не зрозуміло, чи було проведено дослідження впливу відпуску електричної енергії з ВДЕ на результати прогнозування небалансів електроенергії. Як впливає змінний та ймовірнісний характер потужності генерації ВДЕ на якість прогнозування?

6. Чи можна сьогодні використовувати запропоновані методи прогнозування, зокрема в умовах відсутності ретроспективної інформації або змін графіків споживання внаслідок відключень електричної енергії?
7. Як впливають на якість прогнозування аварійні небаланси активної потужності, виникнення яких призводить до зміни потужності між генерацією та навантаженням, а також до зміни обсягів обмінної електроенергії між учасниками ринку?
8. Із тексту роботи не зрозуміло, яким чином можливе практичне застосування розроблених моделей прогнозування обсягу попиту на послугу балансування.

Усі представлені зауваження не мають принципового характеру, та не зменшують достовірність та важливість науково-практичних результатів дисертаційної роботи.

**Висновок.** На основі аналізу дисертаційної роботи Сичової В.В. на тему "Короткострокове прогнозування небалансів електричної енергії в ОЕС України" можна зробити висновок, що представлена робота є повноцінним науковим дослідженням, під час якого отримано нові наукові та практичні результати, що є актуальними для розвитку ринку електричної енергії. Викладені в дисертаційній роботі наукові положення та висновки є переконливими та обґрунтованими як з наукової, так і технічної точок зору. Назва дисертації відповідає її змісту.

Дисертація Сичової В.В. виконана на високому рівні. В роботі продемонстровано сучасні рішення короткострокового прогнозування небалансів електричної енергії, сумарного електричного навантаження та обсягу попиту на послугу балансування.

Вважаю, що дисертація Сичової В.В. відповідає спеціальності 141 – «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» та вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Кабінетом Міністрів України №44 від 12 січня 2022 р., а її авторка Сичова Вікторія Володимирівна заслуговує на присудження їй наукового ступеня доктора філософії.

Рецензент: к.т.н., доцент,  
старший науковий співробітник  
відділу моделювання електроенергетичних  
об'єктів та систем  
Інституту електродинаміки  
НАН України



*А.Стецюк*

Антон СТЕЛЮК

відпис *А.Стецюк* / *А.Стецюк*  
Інституту електродинаміки  
Нац. Академії наук України / *В.В.Хрещів*