

Голові разової спеціалізованої вченої ради PhD 15026
Тернопільського національного технічного
університету імені Івана Пулюя
д.т.н., професору Литвиненку Ярославу Володимировичу

РЕЦЕНЗІЯ

кандидата технічних наук, доцента **Фриза Михайла Євгеновича**
на дисертаційну роботу

Волощука Андрія Володимировича

«Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених
електроенергетичних системах»,
подану на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 12 «Інформаційні технології»
за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи та зв'язок з науковими напрямками, темами

Удосконалення моделей і методів аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах є актуальним завданням, оскільки сучасна енергетика швидко переходить від централізованої структури до мереж із великою кількістю локальних джерел, споживачів, накопичувачів енергії та інтелектуальних лічильників. У таких умовах електроспоживання стає більш динамічним, нерівномірним і залежним від багатьох факторів: погоди, режимів роботи обладнання, поведінки користувачів, тарифів та генерації з відновлюваних джерел. Традиційні підходи не завжди забезпечують достатню точність прогнозування, класифікації й оперативність прийняття рішень. Використання вдосконалених моделей дає змогу виявляти приховані закономірності, прогнозувати пікові навантаження, зменшувати втрати електроенергії, підвищувати надійність мережі та оптимізувати режими її роботи. Це особливо важливо для інтеграції

відновлюваної енергетики, енергоефективності та стабільного функціонування сучасних розподілених систем.

Електроспоживання є одним із ключових параметрів, що характеризує поточний стан енергосистеми. Хоча за одним лише графіком споживання неможливо повністю визначити, чи перебуває енергосистема у збалансованому або незбалансованому режимі, аналіз навантаження дає змогу виявляти важливі ознаки, які можуть свідчити про підвищення ризику виникнення дисбалансу. Саме тому електроспоживання доцільно розглядати як інформативний індикатор потенційно небезпечних режимів роботи енергосистеми.

Незважаючи на значну кількість досліджень у сфері прогнозування електричного навантаження, виявлення аномалій електроспоживання та прогнозування системних небалансів, недостатньо вирішеною залишається задача встановлення зв'язку між параметрами електроспоживання та ризиком виникнення потенційно незбалансованого режиму енергосистеми. Тому розроблення нових математичних моделей та методів аналізу електроспоживання, ідентифікації інформативних ознак потенційно незбалансованого режиму, відокремлення небезпечних аномалій від нормальних коливань навантаження є актуальним науковим завданням, що має важливе значення для інформаційних технологій і визначає тему рецензованого дисертаційного дослідження.

Тема дисертації пов'язана із Концепцією впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 р. № 908-р.

Дисертаційна робота пов'язана з науковими дослідженнями відповідно до напрямів наукової роботи міжнародних наукових шкіл «Моделювання та математичне забезпечення інтелектуалізованих інформаційних систем в медицині, техніці та економіці» та «Математичне і комп'ютерне моделювання складних об'єктів і систем», які функціонують на кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя. Також дисертаційна робота пов'язана з дослідженням в рамках науково-дослідної роботи «Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів» (номер

держреєстрації 0125U000105), виконаної в Тернопільському національному медичному університеті імені І.Я. Горбачевського Міністерства охорони здоров'я України.

2. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

У дисертації Волощука А.В. отримано такі основні наукові результати:

1. Вперше ідентифіковано інформативні ознаки – параметри циклічної кореляційної функції часового ряду погодинного електроспоживання, отримані на основі його математичної моделі у вигляді періодично корельованої випадкової послідовності. Це дозволило використати ідентифіковані ознаки для задачі класифікації режимів електроспоживання підприємства з використанням алгоритмів машинного навчання.
2. Вперше розроблено метод класифікації режимів електроспоживання у вузлах розподілених електроенергетичних систем. Він базується на застосуванні алгоритмів машинного навчання до масиву інформативних ознак, отриманих компонентним методом аналізу періодично корельованих випадкових процесів, що забезпечує надійну автоматизовану ідентифікацію поточного стану системи.
3. Удосконалено підхід до вибору оптимального протоколу передавання даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах із використанням методів машинного навчання на основі запропонованих інформативних ознак.

3. Практична цінність одержаних результатів

Практичне значення отриманих результатів полягає у застосуванні отриманих наукових результатів для створення програмної системи для аналізу та опрацювання даних електроспоживання, яка забезпечує стабільний збір та аналіз даних електроспоживання, адаптивний вибір протоколів передавання при зміні умов роботи каналів зв'язку.

Використані методи на основі теорії періодично корельованих випадкових процесів та алгоритмів машинного навчання можуть бути імплементовані у енергетичних системах різного масштабу - від приватних домогосподарств до комунальних мереж та Smart Grid систем. Практичне застосування дозволить забезпечити стабільне функціонування систем за умов нестабільного передавання даних, оптимізувати використання комунікаційних ресурсів та підвищити надійність функціонування енергосистем.

Запропоновані наукові рішення відзначаються високою гнучкістю та масштабованістю, оскільки вони адаптовані для впровадження в діючі програмно-апаратні комплекси й хмарні інфраструктури без необхідності модифікації їхньої основної архітектури.

Отримано акти впровадження дисертаційної роботи, які засвідчують, що результати використано на практиці наступним чином:

- впроваджено результати дисертаційного дослідження у діяльність ДП ДГ «ПОДІЛЬСЬКЕ» ТДСГДС ІСГ Карпатського регіону НААН;
- впроваджено результати дисертаційного дослідження у діяльність ПП «Науково-виробниче об'єднання «ЕНЕРГООЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ».
- впроваджено результати дисертаційного дослідження у початковий процес кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету ім. І. Пулюя, а також при виконанні науково-дослідної роботи «Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів», яка виконувалась в Тернопільському національному медичному університеті імені І.Я. Горбачевського.

Отримані результати можуть використовуватись також у практичних задачах аналізу інших енергетичних процесів циклічної природи, зокрема для моніторингу газоспоживання, теплоспоживання або водоспоживання промислових та комунальних об'єктів, що характеризуються добовою та сезонною циклічністю.

4. Повнота викладення результатів дослідження у наукових публікаціях, дотримання вимог академічної доброчесності

Наукові результати дисертаційного дослідження Волощука А.В. опубліковано у 11-и наукових працях, з яких 5 – статті у фахових виданнях України категорії Б, 6 -

публікації у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій, з яких 3 індексуються наукометричною базою Scopus.

В опублікованих працях матеріали дисертаційного дослідження викладено в повній мірі. За кількістю та якістю наукових публікацій дисертаційна робота повністю відповідає вимогам п. 8 «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 р. № 44.

Використання в дисертаційному дослідженні наукових напрацювань інших авторів здійснено відповідно до норм наукової етики та супроводжується належними посиланнями на відповідні джерела.

Порушень принципів академічної доброчесності, зокрема фактів академічного плагіату, фабрикації або фальсифікації наукових результатів, у дисертаційній роботі не встановлено.

5. Ступінь обґрунтованості та достовірність сформульованих в дисертації наукових положень, висновків і рекомендацій

Наукова обґрунтованість та достовірність наукових положень, отриманих результатів і запропонованих рішень забезпечуються комплексом взаємопов'язаних чинників. Теоретична обґрунтованість забезпечується застосуванням сучасного математичного апарату теорії циклічних випадкових процесів, теорії періодично корельованих випадкових процесів, методів математичної статистики та аналізу часових рядів. Запропоновані математичні моделі, ідентифіковані інформативні ознаки узгоджуються з відомими в літературі властивостями часових рядів погодинного електроспоживання підприємств та особливостями їх формування.

Додатковим свідченням достовірності отриманих результатів є їх апробація на міжнародних і всеукраїнських наукових конференціях, обговорення під час наукових семінарів, а також упровадження в науково-дослідну діяльність і освітній процес.

Отже, сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації є логічно вмотивованими, методично обґрунтованими та підтвердженими результатами теоретичних і експериментальних досліджень.

6. Оцінка змісту дисертації

Дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням, що складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Структура роботи є логічною та відповідає поставленим у дослідженні завданням. Результати проведених здобувачем досліджень відповідають темі дисертації. Здобувач у достатній мірі володіє методологією наукової діяльності.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційного дослідження, визначено його мету та основні завдання, окреслено об'єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну й практичну цінність одержаних результатів, а також наведено відомості про апробацію результатів і публікації автора..

У **першому** розділі проведено аналіз літературних джерел з тематики наукового дослідження. Зокрема, виконано аналіз сучасного стану розвитку електроенергетичних систем в рамках концепції Energy 4.0. Розглянуто існуючі підходи до аналізу даних електроспоживання. Здійснено аналітичне оцінювання обмежень сучасних методів аналізу даних електроспоживання для класифікації збалансованості енергосистем.

У **другому розділі** охарактеризовано математичні моделі електроспоживання у вигляді циклічного випадкового процесу та періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП). Охарактеризовано синфазний та компонентний методи оцінювання кореляційної функції ПКВП. Обґрунтовано вибір компонентного методу як основного для формування сукупності інформативних ознак. На основі компонентного методу сформовано набір інформативних ознак, що описують кореляційну структуру процесу електроспоживання.

У **третьому розділі** наведено результати експериментального дослідження реальних даних електроспоживання приватного підприємства. Підтверджено циклічну структуру погодинного електроспоживання з домінуванням добового

періоду. Проведено статистичний аналіз інформативних ознак. Здійснено порівняльний аналіз ефективності низки моделей машинного навчання різних типів архітектур для класифікації станів збалансованості енергосистеми. Встановлено, що найвищу точність та стабільність забезпечує модель Extra Trees.

У **четвертому розділі** розроблено програмний модуль, що реалізує повний цикл аналізу даних електроспоживання, від опрацювання сигналу методами ПКВП до автоматичної класифікації стану збалансованості з візуалізацією результатів. Запропоновано підхід до адаптивного вибору оптимального протоколу передавання даних на основі аналізу мережевих параметрів методами машинного навчання, що забезпечує своєчасність надходження телеметричної інформації у розподілених електроенергетичних системах. Встановлено, що за результатами порівняльного аналізу чотирьох моделей машинного навчання найкращу точність класифікації протоколу забезпечила модель MLP Neural Network.

У **висновках** узагальнено основні результати дисертаційної роботи та сформульовано наукові і практичні положення, отримані у процесі дослідження.

Список використаних джерел охоплює значну кількість наукових праць вітчизняних та зарубіжних авторів, що свідчить про ґрунтовний аналіз сучасного стану досліджень у даній предметній області.

У **додатках** подано допоміжні матеріали, що доповнюють основний зміст роботи, зокрема відомості про апробацію результатів дослідження, список публікацій автора за темою дисертації, акти впровадження результатів дослідження.

7. Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Дисертаційна робота виконана на належному науковому рівні, має логічну структуру та відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, зокрема, вимогам чинного Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії.

Тематика, зміст та отримані результати дослідження відповідають спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

8. Зауваження до дисертації

1. На рисунку 2.1 наведено графік електроспоживання приватного підприємства протягом року, де очевидно є наявність тренду. Однак ніде в роботі не вказано яким чином тренд враховано у використовуваній моделі і які методи оцінювання та видалення тренду використовуються.

2. У роботі автор використовує математичні моделі випадкових процесів із періодичними ймовірнісними характеристиками, зокрема, циклічні випадкові процеси та періодично корельовані випадкові процеси. Доцільно було б підтвердити гіпотезу про добову періодичність ймовірнісних характеристик досліджуваного процесу використовуючи результати експериментальних даних.

3. У дисертації наявні математичні формули, які подані некоректно, з помилками, інколи без пояснення усіх символів, що входять до цих формул.

4. Оскільки для аналізу використовувались погодинні дані електроспоживання, у дисертації доцільно було б охарактеризувати модель електроспоживання (а також її характеристики та способи їх оцінювання) у вигляді періодично корельованого випадкового процесу з дискретним часом.

5. Доцільно було б пояснити яким чином побудовано довірчі інтервали, наведені у розділі 3.

6. У дисертації зазначено, що «... використано реальні погодинні дані електроспоживання приватного підприємства, що спеціалізується на виробництві та обробці насіннєвої продукції». У той же час, відсутність інформації щодо того яке конкретно підприємство надало дані (чи хоча б у якому регіоні воно розміщене), якого календарного року стосуються дані, яким чином і хто визначав доби року, де електроспоживання було в збалансованому (206 діб) чи в незбалансованому (159 діб) режимі, тощо, ускладнює визначення рівня загальності отриманих результатів, оцінювання можливості їх застосування для аналізу даних інших підприємств.

Наведені зауваження в цілому не знижують рівня наукової новизни та практичної цінності дисертаційної роботи.

9. Висновки щодо дисертації в цілому:

1. Дисертація Волощука Андрія Володимировича «Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах» є завершеною науковою працею, у якій розв'язано конкретне наукове завдання підвищення ефективності класифікації та передавання даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах шляхом розроблення та використання математичних моделей та методів аналізу даних, алгоритмів машинного навчання з врахуванням циклічності електроспоживання та особливостей його періодичної кореляційної функції, що має істотне значення для інформаційних технологій.

2. За тематикою, змістом та науковими результатами дисертаційна робота відповідає спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

3. Вважаю, що дисертаційна робота «Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах» відповідає вимогам наказу Міністерства освіти і науки України №40 від 12.01.2017 р. «Про затвердження вимог до оформлення дисертацій» (із змінами) та 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 №44 від 12 січня 2022 р., а її автор, Волощук Андрій Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки» в галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Рецензент:

кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя

Михайло ФРИЗ



Підпис
Засвідчую:

Начальник відділу кадрів

Михайло Фриз (Т. Кошак)