

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

РЕЦЕНЗІЯ

доктора технічних наук, професора,

Яснія Олега Петровича

на дисертаційну роботу **Волощука Андрія Володимировича**,
«Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених
електроенергетичних системах»,
подану до захисту на здобуття наукового ступеня **доктора філософії**
в галузі знань 12 «Інформаційні технології»,
зі спеціальності 122 «Комп'ютерні науки»

1. Актуальність теми дисертаційної роботи

Розвиток сучасної електроенергетики в умовах цифрової трансформації, широкого впровадження концепції Energy 4.0, технологій Інтернету речей, інтелектуальних електромереж, децентралізації генерації та інтеграції відновлюваних джерел енергії супроводжується зростанням обсягів даних електроспоживання. За таких умов їх аналіз набуває важливого значення для забезпечення надійності функціонування розподілених електроенергетичних систем, своєчасного виявлення незбалансованих режимів електроспоживання для підтримки процесів прийняття управлінських рішень.

Особливого значення набувають задачі аналізу даних і класифікації режимів електроспоживання, що є необхідною передумовою підвищення ефективності

функціонування розподілених електроенергетичних систем. Водночас особливості даних електроспоживання, для яких характерне поєднання повторюваності та стохастичності, зумовлюють необхідність застосування математичних моделей, що враховують ці властивості. Також важливим є метод аналізу, що дозволяє виокремити інформативні ознаки для виявлення збалансованості режимів роботи електроенергетичних систем.

Поряд із цим, актуальним є використання сучасних методів машинного навчання для класифікації режимів електроспоживання на основі інформативних ознак, отриманих із застосуванням математичних моделей, а також забезпечення надійного передавання даних у розподілених електроенергетичних системах. У зв'язку з цим тема дисертаційної роботи є актуальною, а розроблення моделей і методів аналізу даних електроспоживання у розподілених електроенергетичних системах на основі математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів у поєднанні з методами машинного навчання та адаптивним вибором протоколів передавання даних повною мірою відповідає сучасним науково-практичним потребам підвищення енергоефективності та надійності функціонування розподілених електроенергетичних систем.

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до основних напрямів наукових досліджень кафедри комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та міжнародної наукової школи «Моделювання та математичне забезпечення інтелектуалізованих інформаційних систем в медицині, техніці та економіці». Крім того, результати дисертаційного дослідження пов'язані з виконанням науково-дослідної роботи «Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів» (№ державної реєстрації 0125U000105), у межах якої вони знайшли подальший розвиток і практичне застосування.

2. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в обґрунтуванні методів аналізу даних електроспоживання на основі моделі періодично корельованих випадкових процесів у поєднанні з методами машинного навчання для класифікації режимів електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах.

1. Вперше запропоновано спосіб до формування інформативного простору ознак на основі компонентного методу аналізу періодично корельованих випадкових процесів для класифікації режимів електроспоживання вузлів розподілених електроенергетичних систем, який, на відміну від традиційних статистичних підходів, забезпечує врахування як випадкової, так і циклічної складових сигналів електроспоживання.

2. Вперше запропоновано метод класифікації режимів електроспоживання розподілених електроенергетичних систем, що базується на застосуванні інформативних ознак, сформованих компонентним методом аналізу періодично корельованих випадкових процесів, та сучасних алгоритмів машинного навчання, що дозволило підвищити ефективність ідентифікації режимів функціонування вузлів системи.

3. Удосконалено метод адаптивного вибору протоколів передавання даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах шляхом використання методів машинного навчання з урахуванням характеристик каналів зв'язку, що сприяє підвищенню надійності та стабільності передавання інформації.

4. Подальшого розвитку набув підхід до застосування математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів для аналізу даних електроспоживання шляхом його інтеграції з методами машинного навчання, що розширило можливості класифікації режимів функціонування розподілених електроенергетичних систем.

3. Практична цінність одержаних результатів.

Розроблено програмні модулі для класифікації режимів електроспоживання та адаптивного вибору оптимального протоколу передавання даних з метою забезпечення визначення поточного режиму роботи електроенергетичної системи та адаптивного вибору протоколів передавання даних за змінних умов функціонування каналів зв'язку. Практичне застосування результатів сприятиме підвищенню стійкості та надійності функціонування системи, а також оптимізації передавання даних про електроспоживання. Отримані результати можуть бути інтегровані в наявні програмно-апаратні комплекси та хмарні сервіси без зміни їхньої архітектури, що забезпечує масштабованість і гнучкість впровадження.

Практична значущість проведених досліджень підтверджується актами про впровадження отриманих результатів у навчальний процес і наукову діяльність Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та Тернопільського національного медичного університету імені І.Я. Горбачевського, а також у виробничу діяльність підприємств ПП «НВО «ЕНЕРГООЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ»» та ДП «ДГ «ПОДІЛЬСЬКЕ»».

4. Повнота викладу наукових положень та результатів в опублікованих працях, дотримання вимог академічної доброчесності

Результати дисертаційного дослідження представлено у 11 наукових публікаціях, серед яких 5 статей опубліковано у наукових фахових виданнях України та 6 матеріалів конференцій українського та міжнародного рівнів, з яких 3 індексуються наукометричною базою Scopus. За кількістю та якістю наукових публікацій дисертаційна робота повністю відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії». Публікація наукових результатів дисертанта у рецензованих виданнях, які здійснюють перевірку матеріалів на

наявність неправомірних запозичень, слугує додатковим підтвердженням дотримання принципів академічної доброчесності. Використання у дисертаційній роботі результатів досліджень інших авторів здійснено з дотриманням вимог наукової етики та містить коректні посилання на відповідні джерела. За результатами аналізу дисертаційної роботи Волощука А.В. порушень академічної доброчесності не встановлено.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, сформульовані в дисертаційній роботі Волощука А.В., відзначаються високим рівнем обґрунтованості та достовірності. Це переконливо підтверджується успішним практичним впровадженням отриманих результатів у виробничу діяльність підприємств та освітній процес, що засвідчено відповідними довідками й актами впровадження, а також широкою апробацією основних матеріалів дослідження на міжнародних і всеукраїнських наукових, науково-практичних та науково-технічних конференціях, де вони отримали схвальні відгуки наукової спільноти. Додатковим підтвердженням високої якості проведеного дисертаційного дослідження є позитивна оцінка результатів роботи під час їх обговорення на наукових семінарах кафедри комп'ютерних наук, що переконливо свідчить про їхній вагомий науковий і практичний потенціал.

6. Оцінка змісту дисертації

Дисертація складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Робота викладена на 213 сторінках, включаючи 145 сторінок основного тексту. Перелік використаних джерел містить 140 найменувань.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, зазначено зв'язок з науковими напрямками та програмами, сформульовано мету і завдання дослідження, об'єкт та предмет дослідження, викладено наукову новизну та практичне значення отриманих дисертантом результатів, подано дані про особистий внесок здобувача, апробацію наукових результатів та публікації.

У **першому розділі** проаналізовано сучасний стан розподілених електроенергетичних систем в умовах концепції Energy 4.0, що характеризується децентралізацією генерації, інтеграцією відновлюваних джерел енергії та трансформацією енергосистем у кіберфізичні системи на основі IoT-технологій. Наведено загальну архітектуру розподіленої електроенергетичної системи з визначенням її основних структурних елементів – джерел генерації, накопичувачів енергії, споживачів та систем моніторингу. Проведено огляд та аналіз наявних моделей і методів опрацювання даних електроспоживання, зокрема статистичних, спектральних та нейромережевих, за результатами яких встановлено їхню обмежену здатність одночасно враховувати стохастичну природу сигналу та його повторювану структуру. Здійснено аналітичний огляд сучасних методів машинного навчання – лінійних, ансамблевих, метричних та нейромережевих і їх застосувань у задачах аналізу електроспоживання та класифікації режимів роботи електроенергосистем.

На основі проведеного аналізу обґрунтовано доцільність і перспективність дослідження методів класифікації збалансованих і незбалансованих режимів електроспоживання, що поєднують математичний апарат періодично корельованих випадкових процесів із методами машинного навчання.

У **другому розділі** обґрунтовано застосування математичних моделей, здатних одночасно враховувати стохастичну природу та повторювану (циклічну) структуру сигналу електроспоживання. Розглянуто модель циклічного випадкового процесу, оскільки добовий період електроспоживання є детермінованою величиною, що усуває потребу в ідентифікації функції ритму,

обґрунтовано вибір моделі періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) як базової, оскільки повторюваність у ній безпосередньо інтегрована в кореляційну структуру через умову періодичності статистичних характеристик, що дозволяє формалізувати нестационарність процесу без надлишкової параметризації. Проведено порівняльний аналіз синфазного та компонентного методів оцінювання характеристик ПКВП та обґрунтовано доцільність застосування компонентного методу як ефективного інструменту для формування простору інформативних ознак.

Третій розділ присвячено експериментальній перевірці запропонованого підходу на даних про електроспоживання підприємства. На основі компонентного методу ПКВП сформовано простір із 13 інформативних ознак (9 компонентних та 4 часових), дискримінантна здатність яких підтверджена методами статистичного аналізу. Проведено порівняльний аналіз 14 моделей машинного навчання для класифікації збалансованого та незбалансованого режимів електроспоживання. Для оцінювання інформативності сформованих ознак скористалися алгоритмами MDI та Permutation Importance, результати яких підтвердили доцільність застосування запропонованого простору ознак. Згідно з оцінкою моделі Random Forest, чотири найважливіші ознаки разом забезпечують 78,5% загальної важливості.

У **четвертому розділі** реалізовано програмне забезпечення, що забезпечує аналіз даних електроспоживання, класифікацію режимів електроспоживання та адаптивний вибір протоколу передавання даних. Реалізовано програмний модуль аналізу даних електроспоживання та модуль адаптивного вибору протоколу передавання даних, що підтверджує практичну реалізацію запропонованих у дисертації методів. Аналіз даних із застосуванням математичного апарату ПКВП здійснено у середовищі MATLAB; класифікацію режимів роботи електроенергетичних систем реалізовано мовою програмування Python та відповідними бібліотеками машинного навчання. Програмний модуль

адаптивного вибору протоколу передавання даних, у якому моделі машинного навчання на основі аналізу параметрів мережевого каналу формують рекомендацію щодо вибору одного з протоколів MQTT, CoAP або HTTPS. Представлено архітектуру програмного забезпечення, схеми опрацювання даних та інтерфейс користувача..

Висновки, отримані в дисертаційній роботі, підкреслюють і фокусують увагу на науковій новизні та практичній цінності проведених досліджень. Дисертація містить ґрунтовний аналіз сучасного стану наукових досліджень, опублікованих вітчизняними та закордонними вченими, про що свідчить перелік використаних джерел і посилання на них у тексті дисертації.

Усі теоретичні та практичні положення дисертаційної роботи опубліковано у фахових наукових виданнях та апробовано на наукових і науково-практичних конференціях.

У **додатках** до дисертаційної роботи подано список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертаційної роботи, акти впровадження результатів дослідження, а також фрагменти програмного коду розробленого програмного забезпечення для вибору протоколу, класифікації режимів та компонентного аналізу, що використовувались у запропонованих методах аналізу даних електроспоживання.

7. Відповідність дисертаційної роботи вимогам МОН України

Дисертаційний матеріал представлено у логічній послідовності, із дотриманням структурованості та обґрунтованості викладу. Кожен із чотирьох розділів роботи має власні особливості, проте всі вони органічно взаємопов'язані, що підкреслює цілісність і завершеність наукового дослідження.

Автор користується оригінальним стилем подання матеріалу, а сформульовані висновки та пропозиції є логічним продовженням результатів, викладених у відповідних розділах. Дисертація є завершеним науковим

дослідженням і використовує фахову термінологію галузі знань 12 «Інформаційні технології». Структура роботи, її зміст, послідовність викладу та повнота розв'язаних завдань цілком відповідають заявленій темі дослідження.

Тематика, зміст та наукові результати дисертаційної роботи Волощука А.В. відповідають вимогам спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

8. Зауваження до дисертації

1. Робота має чітку структуру (огляд, моделі, класифікація, програмна реалізація), однак вступ і висновки потребують більшої конкретизації щодо відповідності державним програмам і стратегічним пріоритетам енергетики України.

2. У списку публікацій здобувача наведено значну кількість робіт, проте не завжди чітко простежується зв'язок між окремими статтями та дисертаційними результатами.

3. Автор обґрунтовує вибір моделі періодично корельованого випадкового процесу (ПКВП), проте не подано достатнього порівняння з іншими сучасними стохастичними моделями (наприклад, ARIMA, LSTM).

4. У третьому розділі наведено результати класифікації режимів електроспоживання, однак не розкрито питання масштабованості методів для великих енергосистем або міжрегіональних даних.

5. Автор зазначає про створення програмного модуля, але не наводить прикладів його впровадження у промислових чи енергетичних компаніях.

6. Текст дисертації загалом витриманий у науковому стилі, однак трапляються громіздкі формулювання та повтори, що ускладнюють сприйняття.

7. У переліку скорочень частина термінів подана англійською мовою без пояснень, що потребує їх уніфікації.

Наведені зауваження мають рекомендаційний характер і не впливають на високу оцінку наукової цінності та обґрунтованість висновків дисертації.

Висновки щодо дисертації в цілому:

1. Дисертаційна робота Волощука Андрія Володимировича на тему «Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах» є завершеною кваліфікаційною науковою працею, у якій розв'язано актуальне науково-прикладне завдання аналізу даних електроспоживання на основі моделі у вигляді періодично корельованих випадкових процесів у поєднанні із методами машинного навчання для класифікації режимів електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах.

2. За тематикою, змістом, науковою новизною та практичною спрямованістю дисертаційна робота відповідає спеціальності 122 «Комп'ютерні науки» галузі знань 12 «Інформаційні технології».

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

Рецензент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри систем штучного інтелекту
та аналізу даних Тернопільського національного
технічного університету імені Івана Пулюя

Олег ЯСНІЙ



Підпис
засвідчує
Начальник

Олег Ясний
Андрій О. Волощук