

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

кандидата технічних наук, доцента

Волинця Владислава Ігоровича 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

Перехід сучасного енергетичного сектору до парадигми Energy 4.0, широке впровадження розподіленої генерації та інтеграція відновлюваних джерел енергії стають ключовими факторами цифровізації економіки, оптимізації ресурсів і підвищення стійкості об'єктів критичної інфраструктури. Сучасні електроенергетичні мережі функціонують як складні кіберфізичні системи, надійність яких безпосередньо залежить від швидкості опрацювання та аналізу великих обсягів даних, які надходять від пристроїв телемеханіки. Це є особливо важливим в контексті інтеграції Об'єднаної енергетичної системи України з континентальною європейською мережею ENTSO-E, що висуває жорсткі вимоги до точності оцінювання режимів роботи вузлів і превентивного реагування на технологічні виклики. Автоматизація процесів інтелектуального моніторингу споживчої поведінки дозволяє значно підвищити ефективність управління енергобалансом та мінімізувати ризики аварійних розбалансувань мережі.

Ефективне розпізнавання станів електроенергетичної системи потребує використання математичних моделей, які здатні одночасно враховувати як стохастичну мінливість флуктуацій, так і регулярну добову повторюваність сигналів електроспоживання. Проте у більшості сучасних досліджень переважає емпіричний підхід до побудови моделей машинного навчання, що не враховує внутрішню стохастичну структуру аналізованого сигналу. Стохастична природа електроспоживання, її одночасна циклічність та стохастична мінливість у межах добового циклу розглядається або як джерело шуму в класичних статистичних моделях, або як складність, що компенсується виключно обсягом навчальних даних у нейромережевих підходах. Це суттєво обмежує інтерпретованість результатів класифікації режимів функціонування і ускладнює формування інформативного простору за ознаками, який буде стійким до нестационарних умов функціонування мережі. Крім того, завдання розпізнавання стану системи та адаптивного вибору комунікаційного протоколу передавання даних у більшості робіт розглядаються ізольовано, хоча характеристики комунікаційного середовища та повнота вхідних даних безпосередньо впливають на підсумкову точність аналізу. Зазначені проблеми особливо загострюються в умовах швидкого розвитку розподілених мереж з інтегрованими джерелами відновлюваної енергії. Це, в свою чергу, призводить до зростання кількості активних споживачів та підвищує вимоги до оперативності визначення режимів роботи мережі.

Викладене вище обґрунтовує актуальність теми дисертаційної роботи Волощука Андрія Володимировича, присвяченої розв'язанню науково-прикладної задачі аналізу даних електроспоживання, спираючись на моделі у вигляді періодично корельованих випадкових процесів у поєднанні із методами машинного навчання, з метою класифікації режимів електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах та адаптивного вибору протоколів передавання даних.

2. Зв'язок роботи з науковими програмами, темами

Дисертаційна робота виконана на кафедрі комп'ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя та безпосередньо пов'язана з науковими дослідженнями відповідно до напрямку наукової роботи міжнародної наукової школи «Моделювання та математичне забезпечення інтелектуалізованих інформаційних систем в медицині, техніці та економіці».

Дисертаційна робота пов'язана також із виконанням науково-дослідної роботи «Інтелектуальні моделі в кіберфізичних системах медико-біологічних процесів» (номер державної реєстрації 0125U000105), яку виконано у Тернопільському національному медичному університеті імені І. Я. Горбачевського МОЗ України, в рамках якої здобувачем застосовано математичний апарат періодично корельованих випадкових процесів (ПКВП) для аналізу даних електроспоживання та розроблено методи формування інформативних ознак для класифікації режимів електроспоживання розподілених електроенергетичних систем.

3. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

У дисертаційній роботі здобувачем отримано наступні нові наукові результати.

1. Вперше на основі компонентного методу аналізу ПКВП запропоновано набір інформативних ознак для класифікації режимів електроспоживання вузлів розподіленої електроенергетичної системи, що на відміну від класичних статистичних підходів одночасно враховує стохастичну природу та циклічну структуру сигналу.

2. Вперше запропоновано метод класифікації режимів електроспоживання розподілених електроенергетичних систем із застосуванням комплексу з 14 моделей машинного навчання на основі сформованих ПКВП-ознак, що дозволило ідентифікувати збалансовані та незбалансовані режими роботи електроенергетичних систем.

3. Удосконалено підхід до вибору оптимального комунікаційного протоколу передавання даних електроспоживання (MQTT, CoAP, HTTPS) за допомогою

алгоритмів машинного навчання на основі аналізу мережевих параметрів каналу, що забезпечує своєчасність та стабільність надходження інформації.

4. Отримав подальший розвиток математичний апарат періодично корельованих випадкових процесів в частині його поєднання з методами машинного навчання для аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах, що дало змогу забезпечити класифікацію режимів електроспоживання.

4. Короткий аналіз основного змісту дисертації

У вступі автором ґрунтовно обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, визначено її зв'язок із науковими програмами та напрямками досліджень, сформульовано мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження. Наведено характеристику використаних методів дослідження, розкрито наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено відомості щодо їх апробації, публікацій та особистого внеску здобувача. Вступ відповідає вимогам до кваліфікаційних наукових праць і створює цілісне уявлення про зміст та наукову спрямованість виконаного дослідження.

У першому розділі проведено всебічний аналіз сучасного стану розвитку розподілених електроенергетичних систем в умовах цифрової трансформації енергетичної галузі, інтеграції відновлюваних джерел енергії та впровадження концепції Energy 4.0. Виконано аналіз сучасних моделей і методів опрацювання даних електроспоживання, статистичних моделей часових рядів, спектральних методів, методів машинного навчання та штучного інтелекту. Проведений аналіз дозволив визначити їх переваги та обмеження, сформулювати проблемні питання й обґрунтувати необхідність використання математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів для аналізу даних електроспоживання. За результатами першого розділу автором чітко визначено основні напрями подальших досліджень та сформовано наукове підґрунтя для використання запропонованих моделей і методів.

У другому розділі розглянуто математичні моделі аналізу даних електроспоживання на основі випадкових процесів. Детально досліджено модель циклічного випадкового процесу та модель періодично корельованого випадкового

процесу, виконано їх порівняльний аналіз і наведено аргументоване обґрунтування вибору моделі періодично корельованого випадкового процесу як основної для подальших досліджень. Виконано дослідження на базі синфазного та компонентного методу для аналізу даних електроспоживання, наведено їх математичне обґрунтування та визначено переваги компонентного методу для формування інформативних ознак. Матеріал другого розділу характеризується високим рівнем математичної аргументованості, а наведені результати створюють теоретичну основу для подальшої класифікації режимів електроспоживання.

У третьому розділі наведено результати експериментального дослідження запропонованих моделей і методів на реальних даних електроспоживання. Сформовано інформативний простір із 13 ознак на основі компонентного методу періодично корельованих випадкових процесів, проведено їх статистичний аналіз та досліджено дискримінантну здатність. Значну увагу приділено порівняльному аналізу ефективності сучасних алгоритмів машинного навчання для класифікації режимів електроспоживання. Проведене експериментальне дослідження із використанням комплексу сучасних показників якості класифікації дозволило визначити найбільш ефективні моделі та підтвердити доцільність застосування запропонованого підходу для практичного аналізу режимів функціонування розподілених електроенергетичних систем. Отримані результати є достатньо переконливими та свідчать про високу ефективність запропонованих автором методів.

У четвертому розділі представлено результати практичної реалізації виконаних досліджень. Обґрунтовано архітектуру програмного модуля аналізу даних електроспоживання, реалізовано повний цикл опрацювання даних – від отримання даних електроспоживання, формування інформативних ознак до класифікації режимів електроспоживання та візуалізації отриманих результатів. Окремої уваги заслуговує розроблений підхід до адаптивного вибору оптимального протоколу передавання даних із використанням методів машинного навчання, що сприятиме підвищенню надійності функціонування за умов нестійкого передавання даних, оптимізації використання комунікаційних ресурсів та підвищенню надійності функціонування системи.

Практична реалізація запропонованих моделей та алгоритмів підтверджує завершеність виконаного дослідження та можливість використання отриманих результатів у сучасних інформаційних системах моніторингу та аналізу даних електроспоживання.

У висновках дисертаційної роботи узагальнено основні результати проведених досліджень відповідно до поставленої мети та сформульованих завдань. Висновки логічно випливають зі змісту роботи, відображають основні результати, наукову новизну та практичне значення виконаного дослідження. Вони є достатньо аргументованими, узгоджуються з матеріалами кожного розділу дисертації та підтверджують завершеність проведеного наукового дослідження.

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

Наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи достатньо обґрунтовані коректним використанням математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів та методів машинного навчання, підкріплені ефективною реалізацією програмного модуля аналізу даних електроспоживання, успішним практичним впровадженням результатів дисертаційних досліджень через експериментальне дослідження на прикладі даних електроспоживання підприємства, що продемонструвало відповідність теоретичних досліджень реальним результатам.

Обґрунтованість сформульованих у дисертаційній роботі наукових положень та висновків є достатньою. Вона базується на детальному аналізі розподілених електроенергетичних систем як складних кіберфізичних об'єктів в умовах децентралізації генерації, дослідженні існуючих статистичних і нейромережових моделей часових рядів, чіткій постановці задач дослідження, використанні сучасних дослідницьких методів комп'ютерних наук, обґрунтованому, аргументованому та якісному формулюванні висновків.

Достовірність та обґрунтованість запропонованих моделей та методів аналізу даних електроспоживання підтверджується результатами експериментальних досліджень і коректним застосуванням наукових підходів. Зокрема, формування

простору інформативних ознак на основі компонентного методу аналізу ПКВП, використання комплексу моделей машинного навчання для класифікації режимів роботи енерговузлів, а також адаптивна процедура вибору протоколу передавання даних на основі нейромережі MLP забезпечують обґрунтовану основу для оцінювання параметрів функціонування розподілених електроенергосистем.

Сформульовані в дисертаційній роботі наукові положення, висновки та рекомендації логічно випливають з отриманих результатів, що викладені за допомогою чітких та лаконічних трактувань. Верифікація розробленого програмного модуля підтвердила коректність його функціонування та ефективність опрацювання телеметрії. Тому можна стверджувати, що отримані у роботі висновки та практичні рішення є коректними, достатньо обґрунтованими й можуть бути рекомендовані при побудові сучасних інформаційно-аналітичних систем моніторингу та керування в розподілених електроенергетичних системах.

6. Практичні результати роботи

Практичне значення одержаних результатів полягає, перш за все, у доведенні наукових положень до рівня конкретних методів, програмно-алгоритмічних комплексів та інформаційно-технологічних інструментів аналізу даних електроспоживання та адаптивного керування протоколами передавання даних у розподілених електроенергетичних системах.

На основі проведених досліджень створено програмний модуль для опрацювання даних електроспоживання, який забезпечує повний цикл, від виділення 13 ознак на основі апарату ПКВП до розпізнавання поточного стану функціонування енерговузлів за допомогою методів машинного навчання. Використання зазначених методів та інструментів дало змогу реалізувати програмний модуль адаптивного вибору оптимального протоколу передавання даних залежно від характеристик каналу зв'язку на основі налаштування нейромережевої структури багатошарового перцептрона (MLP).

Завдяки реалізації обчислювальних алгоритмів у середовищі Python/Django та залученню технології контейнеризації забезпечено високу гнучкість,

кросплатформеність та масштабованість створених програмних засобів, що дозволяє інтегрувати їх як ізольовані мікросервіси в існуючі диспетчерські SCADA-системи або промислові платформи Smart Grid без модифікації їхньої базової архітектури.

Результати дисертаційного дослідження знайшли практичне застосування в освітньому процесі Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя при викладанні профільних дисциплін, а також застосовані під час виконання науково-дослідної роботи «Інтелектуальні моделі в кіберфізичних системах медико-біологічних процесів» (№ державної реєстрації 0125U000105), яку виконано у Тернопільському національному медичному університеті імені І.Я. Горбачевського МОЗ України. Створенні програмні рішення автора також успішно впроваджено у виробничу діяльність підприємств, зокрема ПП «НВО «ЕНЕРГООЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ»» та ДП «ДГ «ПОДІЛЬСЬКЕ»», що підтверджує високу прикладну цінність, достовірність та готовність створеної інформаційної технології до реального використання в промислових умовах електроенергетичних систем та підприємств.

7. Оформлення дисертації, дотримання вимог академічної доброчесності та повнота викладу наукових положень і результатів в опублікованих працях

Структура дисертаційної роботи включає вступну частину, чотири основні розділи, заключні висновки, бібліографію та додаткові матеріали. Загальний обсяг дослідження становить 213 сторінок, з яких безпосередньо основний зміст викладено на 145 сторінках. Робота ілюстрована 81 рисунком, містить 31 формулу, 7 таблиць, а бібліографічний список налічує 140 джерел та містить 6 додатків. Робота оформлена згідно з усіма встановленими стандартами.

Дисертаційна робота має логічну та зв'язну структуру. Вона написана державною мовою, характеризується високою культурою наукового письма, де викладені висновки і рекомендації послідовно впливають з наведених у розділах результатів. Список використаних джерел є репрезентативним та містить сучасні праці, що повною мірою відображають стан предметної області дослідження. Застосований математичний

апарат, результати обчислювального моделювання та експериментальні дані викладені аргументовано, із належним науковим обґрунтуванням та їх інтерпретацією.

Результати дисертаційного дослідження повною мірою висвітлено в опублікованих працях здобувача. За темою дисертації опубліковано 11 наукових робіт, серед яких 5 статей у фахових наукових виданнях України та 6 публікацій у матеріалах міжнародних і всеукраїнських наукових конференцій (із них три індексуються наукометричною базою Scopus). Ключові наукові положення дисертації адекватно представлено в опублікованих працях автора. Апробація результатів на наукових заходах підтверджує відповідність роботи сучасним напрямам розвитку комп'ютерних наук та практичну цінність обґрунтованих методів й алгоритмів. За якісними та кількісними показниками публікацій робота цілком задовольняє критерії чинного законодавства.

Аналіз матеріалів засвідчує високу індивідуальність роботи та дотримання принципів академічної доброчесності. По всьому тексту простежується авторський стиль. Використання результатів інших дослідників здійснено з дотриманням вимог наукової етики та містить належні посилання на першоджерела. Оприлюднення результатів у рецензованих виданнях, які здійснюють контроль матеріалів, є додатковим свідченням транспарентності дослідження. За підсумками аналізу дисертації Волощука А.В. фактів порушення академічної доброчесності, неправомірних текстових запозичень, фабрикації чи фальсифікації даних не виявлено.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи

Дисертаційна робота виконана на високому науково-методичному рівні та відповідає сучасним вимогам, що ставляться до кваліфікаційних наукових праць на здобуття ступеня доктора філософії. Матеріал дисертації викладено у логічній послідовності, що забезпечує цілісне сприйняття проведеного дослідження та дозволяє простежити взаємозв'язок між поставленою метою, сформульованими завданнями, отриманими науковими результатами та зробленими висновками. Кожний розділ роботи органічно пов'язаний із попереднім та містить завершені результати окремого етапу

дослідження, що у своїй сукупності формують єдину наукову концепцію аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах.

Тематика дисертаційної роботи, її зміст, наукові результати та використані методи дослідження повністю відповідають спеціальності 122 Комп'ютерні науки галузі знань 12 Інформаційні технології.

9. Зауваження до дисертації:

1. У дисертаційній роботі вживається термін «розподілена електроенергетична система», хоча у сучасній практиці більш поширеним є визначення «електроенергетична система з розподіленою генерацією» (Distributed Power Generation). Кращим варіантом терміну є «локальна енергетична система» або ж «micro grid».

2. На с. 16 вжито формулювання «...опрацювання даних електроспоживання на всіх рівнях електроенергосистеми». З нього не зрозуміло, чи проводився аналіз даних про споживання в системах власних потреб електростанцій, підстанцій, розподільних пунктів тощо на всіх технологічних рівнях електроенергетичної системи, чи обробка інформації стосується лише найнижчого ієрархічного рівня, тобто активних споживачів.

3. При описі практичного значення отриманих результатів автор недостатньо обґрунтував яким саме чином використані методи на основі теорії періодично корельованих випадкових процесів і алгоритмів машинного навчання можуть бути впроваджені у низьковольтних електричних мережах приватних домогосподарств.

4. На с. 22 при описі можливостей впровадження автор пише про впровадження в енергетичні системи, які, як відомо містять елементи теплоенергетики, хоча в дисертаційній роботі розглядаються електроенергетичні системи.

5. У списку використаних джерел відсутнє посилання на ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення», який регламентує допустимі наслідки від «збалансованих» і «незбалансованих» режимів електроспоживання (за версією автора).

6. У п.1.1 на с. 28 вказана некоректна інформація щодо вимог для частоти в системах, які синхронно під'єднані до ОЕС України. Згідно ДСТУ EN 50160:2023 п. 4.2.1 вона складає $50\text{Гц} \pm 1\%$ (тобто 49,5 Гц.. 50,5 Гц) протягом 99,5 % часу за рік.

7. У п.1.1 на с. 25 присутній вираз «При цьому такий аналіз є важливим для ... виявлення аномалій та передаварійних станів, ...». Вказана проблема та її вирішення не є завданням даного дисертаційного дослідження, оскільки вимагає інших методів дослідження та аналізу інших параметрів, зокрема опору ізоляції, температури провідників тощо.

Проте, висловлені зауваження не є визначальними і не зменшують загальну наукову новизну та практичну значимість результатів та не впливають на позитивну оцінку дисертаційної роботи.

Висновки щодо дисертації в цілому

Дисертаційна робота Волощука Андрія Володимировича «Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах» представляє собою завершену кваліфікаційну науково-дослідну працю, що включає нові теоретично обґрунтовані результати. У дисертації вирішено науково-прикладне завдання аналізу даних електроспоживання на основі моделі періодично корельованих випадкових процесів у поєднанні з алгоритмами машинного навчання для класифікації режимів електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах.

Отримані наукові та практичні результати мають суттєве значення для розвитку галузі інформаційних технологій загалом та комп'ютерних наук зокрема. Тематика та зміст дисертаційного дослідження повністю відповідають профілю спеціальності 122 Комп'ютерні науки. Проведені експериментальні дослідження, широка апробація у фахових виданнях (зокрема тих, що індексуються наукометричною базою Scopus) та успішна програмна реалізація обґрунтованих автором методів й алгоритмів підтверджують їхні внутрішню логічну завершеність, репрезентативність, високу достовірність та прикладну спроможність для побудови сучасних інформаційно-аналітичних систем енергетичного моніторингу. Отже, з урахуванням актуальності досліджуваної проблематики, наукової обґрунтованості теоретичних положень,

висновків та практичних рекомендацій, викладених у дисертаційній роботі, їх інноваційного характеру та прикладного значення, адекватності представлення результатів дослідження у фахових публікаціях, дотримання норм академічної доброчесності, констатую, що дисертація повністю задовольняє критерії «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, які встановлюються для дисертаційних досліджень на здобуття наукового ступеня доктора філософії. Автор дисертації, Волощук Андрій Володимирович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 Комп'ютерні науки в галузі знань 12 Інформаційні технології.

Офіційний опонент:

кандидат технічних наук, доцент,

доцент кафедри електричної інженерії

Луцького національного технічного

університету



Владислав ВОЛИНЕЦЬ

ПІДПИС ЗАСВІДЧУЮ:
Учений секретар
ЛУЦЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
професор Алла ЗЕМКО