

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

ВІДГУК ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

доктора технічних наук, професора
Юзефовича Романа Михайловича 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

Сучасний розвиток електроенергетичних систем у контексті децентралізації генерації, масштабного впровадження відновлюваних джерел енергії та активного поширення концепції Energy 4.0 виступає одним із провідних напрямів цифрової трансформації енергетики. В таких умовах особливої ваги набувають завдання забезпечення стабільного електропостачання, підвищення ефективності використання енергетичних ресурсів та інтеграції сучасних інформаційних технологій для моніторингу й аналізу режимів роботи електроенергетичних систем.

Особливої актуальності результати дисертаційного дослідження набуває в умовах інтеграції Об'єднаної енергетичної системи України з континентальною мережею ENTSO-E, що висуває додаткові вимоги до ефективності аналізу даних електроспоживання.

Слід зазначити, що використання сучасних моделей і методів аналізу даних електроспоживання є одним із ключових чинників підвищення ефективності функціонування електроенергетичних систем. Водночас існуючі підходи до аналізу даних електроспоживання не завжди забезпечують одночасне врахування повторюваної структури та стохастичного характеру процесів електроспоживання, що ускладнює формування інформативного простору ознак для подальшої класифікації режимів електроспоживання, що обмежує можливості формування набору інформативних ознак і знижує ефективність класифікації режимів роботи розподілених електроенергетичних систем.

З огляду на викладене, тема дисертаційної роботи Волощука Андрія Володимировича “Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах”, спрямована на розв’язання важливого науково-прикладного завдання класифікації режимів електроспоживання на основі математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів у поєднанні з методами машинного навчання та адаптивного вибору протоколів передавання даних, є безперечно актуальною як з наукової, так і з прикладної точки зору.

2. Зв’язок роботи з науковими програмами, темами

Дисертаційна робота Волощука А.В. виконана на кафедрі комп’ютерних наук Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (далі – ТНТУ ім. І. Пулюя). Тематика роботи пов’язана з напрямом наукової роботи міжнародної наукової школи “Моделювання та математичне забезпечення інтелектуалізованих інформаційних систем в медицині, техніці та економіці”, що функціонує на кафедрі комп’ютерних наук ТНТУ ім. І. Пулюя.

Дисертаційна робота пов’язана також із виконанням науково-дослідної роботи “Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів” (№ державної реєстрації 0125U000105), яку виконано у Тернопільському національному медичному університеті ім. І. Я. Горбачевського МОЗ України, в межах якої здобувачем обґрунтовано та сформовано інформативні ознаки на основі апарату періодично корельованих випадкових процесів для застосування в інтелектуальних системах аналізу та класифікації режимів електроспоживання розподілених електроенергетичних систем.

3. Наукова новизна результатів дисертаційної роботи

Сукупність отриманих наукових результатів забезпечує розв'язання задачі аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах на основі моделі періодично корельованих випадкових процесів і методів машинного навчання. У дисертаційній роботі здобувачем отримано наступні нові наукові результати.

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

2. Вперше запропоновано метод класифікації режимів електроспоживання розподілених електроенергетичних систем на основі інформативних ознак, отриманих компонентним методом ПКВП, із застосуванням методів машинного навчання, що забезпечило можливість ідентифікації режимів електроспоживання вузлів розподіленої електроенергетичної системи.

3. Удосконалено підхід до вибору оптимального протоколу передавання даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах з використанням методів машинного навчання на основі параметрів каналу передавання даних, що дало змогу забезпечити стабільність передавання даних.

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

Вступ містить обґрунтування актуальності обраної тематики, формулювання мети та задач дослідження, визначення його об'єкта і предмета, виклад наукової новизни та практичної значущості одержаних результатів, інформацію про зв'язок із науковими програмами і темами, а також відомості про апробацію результатів та авторські публікації за темою дисертації.

Також наведено інформацію про апробацію результатів дослідження, публікації автора та зв'язок роботи з науковими програмами, що відповідає встановленим вимогам до дисертаційних робіт.

Перший розділ “Аналіз сучасного стану проблеми аналізу та класифікації режимів електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах” присвячений аналізу сучасного стану проблеми аналізу та класифікації режимів електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах. У розділі розглянуто особливості функціонування розподілених електроенергетичних систем в умовах розвитку концепції Energy 4.0, проаналізовано існуючі математичні моделі та методи аналізу даних електроспоживання, а також сучасні методи машинного навчання, що застосовуються для класифікації режимів електроспоживання. За результатами проведеного аналізу обґрунтовано загальний підхід до розв'язання поставленої наукової задачі та сформульовано основні завдання дисертаційного дослідження.

У другому розділі “Математичні моделі та методи аналізу режимів електроспоживання на основі апарату періодично корельованих випадкових процесів” проведено дослідження математичних моделей і методів аналізу даних електроспоживання на основі апарату періодично корельованих випадкових процесів. Здійснено порівняльний аналіз моделей циклічних та періодично корельованих випадкових процесів і обґрунтовано доцільність використання моделі ПКВП для аналізу даних електроспоживання з урахуванням характерної добової повторюваності. Також виконано порівняльний аналіз синфазного та компонентного методів аналізу ПКВП, за результатами якого обґрунтовано доцільність застосування компонентного методу для формування інформативних ознак.

У третьому розділі “Формування інформативного простору ознак та класифікація режимів електроспоживання методами машинного навчання” викладено результати експериментального дослідження, у межах якого сформовано інформативний простір ознак на основі компонентного методу ПКВП та проведено порівняльний аналіз методів машинного навчання для класифікації режимів електроспоживання. На основі статистичних характеристик компонентного методу ПКВП сформовано простір із 13 інформативних ознак. Проведено порівняльний аналіз 14 моделей машинного навчання для задачі класифікації збалансованих і незбалансованих режимів електроспоживання.

Найвищі результати забезпечив класифікатор Extra Trees. Варто відзначити, що ефективність запропонованого підходу підтверджено результатами комплексного оцінювання моделей машинного навчання, а застосування методів MDI та Permutation Importance дало змогу проаналізувати внесок окремих ознак у результати класифікації.

Четвертий розділ “Програмна реалізація методів аналізу та класифікації режимів електроспоживання” присвячено практичній реалізації результатів дослідження. На основі запропонованих підходів розроблено програмний модуль аналізу даних електроспоживання у середовищі Python з використанням фреймворку Django, а реалізацію математичних моделей виконано в середовищі MATLAB. Наведено схему етапів опрацювання даних та функціональну схему модуля адаптивного вибору протоколу, що ілюструють послідовність переходу від вхідних даних електроспоживання до класифікації режиму електроенергетичної системи. Розроблено програмний модуль адаптивного вибору протоколу передавання даних на основі методів машинного навчання, який забезпечує вибір оптимального протоколу залежно від параметрів каналу зв’язку, що забезпечує стабільність функціонування системи та дозволяє інтегрувати розроблений модуль у системи диспетчерського керування та платформи Smart Grid. Отримані результати доведено до рівня практичної реалізації, яка забезпечує повний цикл від отримання даних електроспоживання до класифікації режиму електроспоживання електроенергетичної системи з інтерактивною візуалізацією результатів.

Висновки до розділів і загальні висновки дисертаційної роботи є логічними, достатньо аргументованими й узгодженими з поставленою метою та завданнями дослідження. Аналіз структури і змісту роботи в цілому дає підстави стверджувати, що поставлені у вступі завдання дисертаційного дослідження здобувачем розв’язано послідовно та в повному обсязі.

5. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність

Наукові положення, висновки та рекомендації дисертаційної роботи є достатньо обґрунтованими, логічно взаємопов’язаними та підтвердженими результатами теоретичних і експериментальних досліджень. Виконане дослідження ґрунтується на коректному застосуванні апарату теорії періодично корельованих випадкових процесів, методів

математичної статистики, а також сучасних алгоритмів машинного навчання, що в сукупності забезпечує належний науковий рівень одержаних результатів.

Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується аналізом сучасного стану досліджуваної проблематики, який дозволив виявити недоліки існуючих математичних моделей і методів аналізу даних електроспоживання, визначити напрями подальших досліджень та обґрунтувати вибір математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів для розв'язання поставлених задач.

Достовірність отриманих результатів підтверджується використанням математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів, сучасних методів машинного навчання, а також результатами експериментальних досліджень, що узгоджуються з теоретичними положеннями дисертаційної роботи. Порівняльний аналіз 14 моделей машинного навчання, із використанням різних критеріїв оцінювання, демонструє високий рівень класифікаційної здатності побудованих моделей, що свідчить про всебічність прийнятого підходу до оцінювання результатів та забезпечує належний рівень довіри до сформульованих висновків.

Достовірність практичних результатів додатково підтверджується програмною реалізацією запропонованих моделей і методів, що підтверджує придатність запропонованого підходу.

Наукові результати дисертаційної роботи пройшли належну апробацію на конференціях та опубліковані у фахових наукових виданнях, що є додатковим свідченням їх актуальності, наукової новизни та визнання науковою спільнотою.

6. Практичні результати роботи

Практичне значення одержаних результатів полягає у розробленні програмних модулів, призначених для класифікації режимів електроспоживання та адаптивного вибору оптимального протоколу передавання даних, що забезпечує визначення поточного режиму роботи розподіленої електроенергетичної системи й адаптивного вибору протоколів передавання даних у разі зміни умов функціонування каналів зв'язку. Запропоновані методи, що ґрунтуються на математичному апараті періодично корельованих випадкових процесів у поєднанні з алгоритмами машинного навчання, є придатними до впровадження

в розподілених електроенергетичних системах від приватних домогосподарств та локальних систем електропостачання до комунальних електричних мереж і інтелектуальних мереж Smart Grid. Практичне застосування одержаних результатів сприятиме підвищенню стійкості функціонування систем в умовах нестабільного передавання даних, оптимізації використання комунікаційних ресурсів та підвищенню надійності їх роботи в цілому. Важливо зазначити, що отримані результати можуть бути інтегровані в існуючі програмно-апаратні комплекси та хмарні сервіси без зміни їх архітектури, що забезпечує масштабованість і гнучкість запропонованих рішень.

Результати дисертаційного дослідження знайшли практичне застосування у виконанні науково-дослідної роботи “Інтелектуальні моделі в кібер-фізичних системах медико-біологічних процесів” (№ державної реєстрації 0125U000105) Тернопільського національного медичного університету ім. І.Я. Горбачевського МОЗ України. Результати дисертаційної роботи впроваджено у ПП “НВО ЕНЕРГООЩАДНІ ТЕХНОЛОГІЇ” (м. Тернопіль), ДП “ДГ ПОДІЛЬСЬКЕ” (м. Хоростків) та Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (кафедра комп’ютерних наук, дисципліна “Моделювання систем”), що засвідчує практичну значущість та готовність розроблених програмних рішень до реального використання у виробничій діяльності та освітній практиці.

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

Дисертаційна робота має чітку логічну структуру, що включає вступ, чотири розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки. Загальний обсяг дисертації становить 213 сторінок, з яких основний текст викладено на 145 сторінках. Робота містить 81 рисуноків, 31 формул, 7 таблиць; список використаних джерел налічує 140 найменувань, додатки подано на 32 сторінках (6 додатків). Дисертацію оформлено згідно з “Вимогами до оформлення дисертації”, затвердженими Наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 року № 40. Структура дисертаційної роботи є логічною та зв’язною. Основні висновки та рекомендації логічно випливають з отриманих у розділах роботи результатів. Список використаних джерел містить сучасні джерела, що відповідають предметній області дослідження.

У дисертації не виявлено текстових запозичень та використання наукових результатів інших дослідників без належного посилання на відповідні джерела. Список використаних джерел є репрезентативним та відповідає предметній області дослідження.

Основні наукові результати дисертаційної роботи висвітлено у 11 наукових публікаціях, з яких 5 статей опубліковано у фахових виданнях України та 6 праць представлено на конференціях, у тому числі 3 – у виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus. За кількісними та якісними показниками публікацій дисертаційна робота повністю задовольняє вимоги “Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії”. Ключові наукові положення дисертації адекватно представлені в опублікованих працях автора.

8. Мова та стиль дисертаційної роботи

Виклад матеріалу в дисертаційній роботі здійснено українською мовою з дотриманням норм академічного стилю. Текст роботи є логічно структурованим, окремі підрозділи послідовно підпорядковані загальній логіці дослідження, а перехід від теоретичних побудов до експериментальних результатів і прикладних реалізацій виглядає природним. Стиль викладу витриманий, формулювання чіткі, понятійний апарат застосовується послідовно протягом усієї дисертації, що сприяє точному сприйняттю наукових результатів читачем.

Тема, зміст та отримані наукові результати дисертаційної роботи повністю відповідають спеціальності 122 “Комп’ютерні науки” галузі знань 12 “Інформаційні технології”.

9. Зауваження до дисертації

1. Автор, на стор. 55 дисертації стверджує, що “Оцінки математичного сподівання та кореляційної функції ЦВП є незміщеними та узгодженими за умови ергодичності процесу та достатньої кількості спостережених циклів.” Проте не вказано, яка саме кількість циклів є достатньою і які будуть величини похибок?

2. У формулах (2.6), (2.7) не пояснена змінна M_1 .

3. Використання терміну “узгоджений” до оцінювання статистичних параметрів є некоректним, загальноприйнятим є термін “слушність оцінки”.

4. Автор, на стор. 72 дисертації стверджує, що оцінки кореляційних компонентів та їх усереднених реалізацій, отримані синфазним методом, є незміщеними та асимптотично ефективними, що забезпечує високу точність моделювання та прогнозування. З цього не зрозуміло, які величини похибок при моделюванні між реальними і симульованими даними, а також не вказана ймовірність та допустимі похибки прогнозування?

5. На стор. 72 “Синфазний метод забезпечує статистичне оцінювання ..., що дозволяє отримати інформативний опис структури процесу для кожної фази добового циклу.” Слід було означити інформативний опис структури процесу для кожної фази добового циклу та описати як саме забезпечується його наповнення.

6. На стор. 98 дисертації згадано характеристику x_{45} , яка залежить від кількості відліків $N = 720$ у межах одного періоду. Чи вона втрачає свою інтерпретацію при інших значеннях N !? Автору слід було ввести характеристику, яка б визначала “критичну точку максимальної швидкості зростання сигналу” в залежності від кількості відліків у межах одного періоду.

7. Підписи до рис. 2.18 і 2.19 однакові. Рис. 3.13, 3.31, 4.9, 4.10, 4.12, 4.13 слід було подати більш чіткіше. По тексті зустрічаються орфографічні та синтаксичні помилки.

Висновок щодо дисертації в цілому.

Вважаю, що дисертаційна робота здобувача ступеня доктора філософії Волощука Андрія Володимировича на тему “Моделі та методи аналізу даних електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах” виконана на високому науковому рівні, не порушує принципів академічної доброчесності та є завершеним науковим дослідженням, сукупність теоретичних і практичних результатів якого розв’язує науково-прикладне завдання, що має істотне значення для підвищення ефективності аналізу та класифікації режимів електроспоживання в розподілених електроенергетичних системах на основі математичного апарату періодично корельованих випадкових процесів, сформованого простору інформативних ознак, методів машинного навчання та алгоритму адаптивного вибору протоколів передавання даних.

Дисертаційна робота за актуальністю, практичною цінністю та науковою новизною повністю відповідає вимогам чинного законодавства України, що передбачені в п. 6–9 “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.

Здобувач Волощук Андрій Володимирович заслуговує на присудження ступеня доктора філософії в галузі знань 12 “Інформаційні технології” за спеціальністю 122 “Комп’ютерні науки”.

Офіційний опонент:

завідувач відділу методів та засобів
відбору й обробки діагностичних сигналів
Фізико-механічного інституту ім. Г. В. Карпенка
Національної академії наук України,
доктор технічних наук, професор



Роман ЮЗЕФОВИЧ

