

ВІДГУК

офіційного опонента Черненко Павла Олексійовича на дисертаційну роботу Бондарчука Анатолія Сергійовича на тему «Методи і моделі визначення електричного навантаження цивільних об'єктів з використанням графічного і макромодельовання та фрактальних властивостей», подану на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

1. Актуальність теми дисертації

Електричне навантаження (ЕН) є одним із важливих параметрів, який визначає режими роботи об'єднаної енергосистеми України (ОЕС) на всіх її ієрархічних рівнях. Розробка методів і математичних моделей ЕН, які адекватні реальним процесам, дозволяє покращити ефективність розв'язання технологічних задач автоматизованої системи диспетчерського управління ОЕС і таким чином підвищити економічність і стійкість ОЕС, а також надійність електропостачання споживачів електроенергії. З впровадженням в енергетику України більш удосконаленого ринку електроенергії – двосторонніх договорів і балансуєчого ринку (РДДБ) підвищуються вимоги до більш точного визначення ЕН та його короткострокового прогнозування.

Останнім часом в Україні спостерігається спад промислового виробництва. При цьому за даними НЕК «Укренерго» за 2019 рік, споживання електричної енергії у промисловості і сумарного споживання комунально-побутового (КП) сектору і населення (Н) майже зрівнялось. Таке співвідношення споживання електроенергії змінило структуру сумарного електричного навантаження енергосистем і енергопостачальних компаній, що потребує розробки математичних моделей ЕН з більш точним врахуванням впливу метеорологічних, астрономічних і календарних факторів (багатофакторних моделей). Також збільшуються вимоги до математичних моделей ЕН при проектуванні об'єктів КП і Н в зв'язку з необхідністю застосування Smart Grid технологій. Враховуючи наведене вище, тема дисертаційної роботи А.С. Бондарчука, яка присвячена розробці удосконалених методів і математичних моделей ЕН при експлуатації і проектуванні об'єктів КП і Н, є дуже актуальною. Дослідження з аналізу, уточненню та прогнозуванню ЕН можна проводити в двох напрямках: при зацікавленості верхнього рівня – електропостачальних компаній та енергосистем та при зацікавленості нижнього рівня – комунально-побутових і житлових (КПЖ) об'єктів споживання електроенергії, як це і зроблено в даній дисертаційній роботі.

2. Короткий аналіз змісту та відповідність його завданню дисертації

Дисертаційна робота Бондарчука А. С. складається з анотації, вступу, 7 розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 414 сторінок, в тому числі, 303 сторінки основної

частини, 141 рисунок, 30 таблиць, список використаних джерел із 176 найменувань на 22 сторінках та 6 додатків.

У першому розділі зроблено аналітичний огляд робіт і методів, які присвячені визначенню рівня достовірності інформації про ЕН та прогнозування електричного навантаження. Відмічено, що існуючі методи базуються на використанні коефіцієнтів розрахункового навантаження за рівнями електропостачання. Застосовуються різного типу статистичні методи, методи з використанням апарату нечітких множин, штучного інтелекту у вигляді різного типу нейронних мереж, методи упорядкованих діаграм, методи макромодельовання та інші, які використовуються для розрахунку навантажень промислових підприємств. Для визначення розрахункового навантаження КПЖ об'єктів за Державними будівельними нормами (ДБН) передбачають використання коефіцієнта попиту, питомого навантаження на одиницю площі, кВт/м², або на кількість жител (котеджів), кВт/житло (котедж), чи на одиницю вимірювання, кВт/на місце, кВт/на одного учня, кВт/на ліжко-місце тощо. Вони наведені для попереднього визначення навантаження на вводах до об'єктів із наступним використанням коефіцієнтів участі, розбіжності цих навантажень у максимумі, відповідність яких фактичним електричним навантаженням перевіряються у роботі дослідженням. Разом із тим, розрахунки електричних навантажень, зіставлення теоретичних обчислень і прогнозів з фактичними величинами електричних навантажень КПЖ об'єктів, житлових мікрорайонів міста, недостатньо висвітлено у наукових працях, на відміну від численних досліджень щодо електричних навантажень енергосистем та промислових підприємств.

У другому розділі наведено результати дослідження високоточними приладами технічних характеристик традиційних та альтернативних джерел енергії для електропостачання КПЖ об'єктів, кожний з яких особливо впливає на величину електричного навантаження. Наприклад, традиційна система електропостачання від енергосистеми найбільш поширена, однак у такий системі все більше виявляється спотворення (з різних причин) синусоїдальності кривої за напругою та струмом, яке збільшує величину розрахункового навантаження відносно першої гармоніки. Мережеві сонячні електростанції, що безпосередньо приєднуються до міської електричної мережі КПЖ об'єкта, знаходять все більше застосування як відновлювальні джерела живлення, що екологічно «чисті». Однак, вони виявляються генераторами вищих гармонік в елементах систем електропостачання (СЕР) через наявність інверторів. Гібридна система, під якою розуміється сумісна робота різних відновлюваних джерел енергії, теж може містити джерела електромагнітного збурення в системі споживання електроенергії. Інтегрована система та джерела розосередженої енергії, що об'єднує між собою різні джерела енергії і споживачів у єдину технологічну систему – є новою стратегією розвитку європейських енергетичних мереж за архітектурою, але такі системи не виключають генерацію вищих гармонік, що викликають збільшення

розрахункового навантаження, порівняно з основною гармонікою, та ряд інших негативних явищ.

У **третьому розділі** представлено результати моделювання та аналізу графіків електричних навантажень електроприймачів (ЕП), КПЖ об'єктів на базі експериментально отриманих даних вимірювально-інформаційної техніки, з використанням сплайн-інтерполяції, сплайн-апроксимації, поліноміальних інтерполяційних сплайнів 3-го ступеня, регресійного, кореляційного, дисперсійного аналізу. Отримані моделі дозволяють з достатньою для практичних цілей точністю визначати їх параметри, такі як розрахунковий (півгодинний) максимум навантаження, усереднене навантаження, коефіцієнт заповнення графіка, кількість споживаної електроенергії за будь-який період часу та ін.

У **четвертому розділі** представлені результати розробки автором дисертації методів і моделей визначення електричного навантаження КПЖ об'єктів з використанням графічного моделювання і макромодельовання графіків електронавантаження та їхніх фрактальних властивостей. Розроблені моделі електричного навантаження ЕП, жител, окремих КПЖ об'єктів та їх синтез з використанням сплайнів, математичного сподівання усереднених функцій, що забезпечило суттєве підвищення рівня достовірності розрахункового питомого електричного навантаження порівняно з визначенням за нормативними показниками. Це підтверджено натурними експериментами в СЕП об'єктів мікрорайону міста. Метод графічного моделювання використовує чисельні розрахунки з їхнім графічним відображенням, що сприяє кращому його використанню на практиці.

Застосований в проведених дослідженнях метод побудови однофакторних макромодель електроспоживання (ЕС) дозволяє оцінювати кількісні характеристики ЕС у майбутньому, використовуючи апріорі побудовані дискретні автономні макромоделі без використання, на думку автора, процедур попередньої їх обробки. На думку рецензента, ці макромоделі є однофакторними і в них не передбачено врахування впливу на електричне навантаження зовнішніх факторів: метеорологічних, астрономічних, календарних. Застосування цих моделей для прогнозування загальнобудинкового навантаження можливе тільки в тому випадку, якщо безперервно працює в регламентованому режимі централізована система обігріву будинку. Тоді можна проводити аналіз результатів макромодельовання для моделювання місячної та сезонної динаміки з прийнятною для практики точністю.

В цьому ж розділі описано застосований автором дисертації метод фрактальних множин і фрактальної геометрії при прогнозуванні електричних навантажень КПЖ об'єктів. При цьому використовуються самоафінні структури – фрактали, кожна частина яких повторює у своєму розвитку розвиток усієї моделі в цілому. За методом R/S-аналізу апріорної інформації проілюстрована самоафінність структури електричного навантаження КПЖ об'єктів та встановлено фрактальний принцип його формування, який дозволяє

чисельно оцінити за показником Херста наявність принципу довготривалої пам'яті та характер зміни в часі тренду.

Наведені результати дисперсійного аналізу для оцінки впливу зовнішніх чинників, таких як температура довкілля та світлова тривалість доби на величину електроспоживання об'єктів міста протягом року. Слід зазначити, що дисперсійний аналіз застосовується тільки для випадкових величин, а метеорологічні та астрономічні фактори нестационарно змінюються в часі, тому наведені оцінки є приблизними.

У п'ятому розділі наведено удосконалений автором метод обчислення впливу струму вищих гармонік на навантаження електричних мереж, що ґрунтується на моделюванні за теорією сплайнів режиму роботи електроприймачів КПЖ об'єктів. Електромагнітна сумісність викликає глобальну проблему в СЕП внаслідок широкого застосування ЕП з нелінійними характеристиками, що генерують вищі гармоніки. Математичне моделювання динаміки спектру струмів у групових мережах об'єктів, дозволило оцінити їх вплив на додатковий нагрів електричної мережі, порівняно з дією першої гармоніки. Це дозволяє передбачати періоди перегріву електричної мережі. За допомогою кореляційного аналізу визначено вплив ЕП із нелінійними характеристиками на комерційні показання лічильників.

У шостому розділі представлено результати досліджень режиму роботи мережевої сонячної електростанції. При цьому виявлено спектри вищих гармонік за напругою і струмом на виході мережевого інвертора, ЕП з нелінійними характеристиками та вплив їх на електричне навантаження СЕП КПЖ об'єктів. Натурні експериментальні дослідження, які проводились на устаткуванні мережевої сонячної електростанції, показали суттєвий вплив інвертора та ЕП на навантаження електропроводки від протікання вищих гармонік від 2 до 40-ї. Це викликає збільшення на 7–10 % розрахункового струму, залежно від глибини спотворення струму ЕП з нелінійними характеристиками.

Моделювання динаміки електричного навантаження за сплайн-інтерполяцією надає можливість, з достатнім для практики рівнем достовірності, графічно визначити величину зменшення щодобових витрат електроенергії в міській електричній мережі за рахунок умовного цільового зрівнювання графіка навантаження. За допомогою графічного методу з використанням сплайн-інтерполяції показано, що запровадження багатозонних лічильників і тарифів за зонами доби, з одночасним перенесенням роботи окремих електроприймачів на нічні години, є інструментом зрівнювання добового графіка і, як наслідок, зменшення розрахункового електричного навантаження мережі.

У сьомому розділі наведена розроблена здобувачем методика прогнозування ефективності (енергетичної, економічної та екологічної) роботи гібридних сонячних колекторів, які спроможні одночасно генерувати як електричну, так і теплову енергію для енергозабезпечення багатопверхових житлових будинків. Від інших методик ця методика відрізняється урахуванням

двох факторів: величини питомого електричного навантаження багатопверхового будинку та ринкових цін на ці види енергії. За даними попередніх років було зроблено прогнозування динаміки «основних» і «зелених» тарифів на енергію, вартості обладнання колекторів та визначено дисконтований прибуток і строк окупності інвестиційного проєкту. Це дозволило розрахувати величини вкладень і прибутків мешканців багатоквартирних будинків за «зеленим» і «основним» тарифом на електричну та теплову енергію за період експлуатації гібридного сонячного колектора за відповідний рік. Попередні розрахунки показали, що за «основним» тарифом інноваційний проєкт буде вигідний тільки за умови подальшого здешевлення сонячних колекторів на світовому ринку.

У висновках дисертаційної роботи наведено в 12 пунктах основні наукові та практичні результати проведених досліджень. Висновки є достатньо повними, логічними та відображають сутність дисертаційної роботи.

У додатках достатньо повно представлено результати натурних вимірювань електричних параметрів у системах електропостачання КПЖ об'єктів, вхідні апріорні дані для графічного і макромодельовання, фрактального R/S-аналізу електричного навантаження, база даних щодо технічних характеристик нелінійних електроприймачів, акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

Аналіз змісту дисертації показав відповідність його завданню.

Наукові результати та висновки кандидатської дисертації Бондарчука А. С. не виносяться на захист докторської дисертації.

3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність та новизна

У дисертаційній роботі Бондарчука А. С. ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, їх достовірність достатньо високі.

Новизною проведених здобувачем досліджень я вважаю такі отримані результати:

- метод розрахунку електричного навантаження КПЖ об'єктів шляхом графічного синтезу динаміки його складових з використанням математичного апарату сплайнів, який дозволив у 1,5–3,5 разів підвищити достовірність його визначення, порівняно з обчисленням за чинними нормативними показниками, що підтверджено натурними експериментами на реальних КПЖ об'єктах;

- доведена за методом R/S-аналізу апріорної інформації самоафінність структури електричного навантаження КПЖ об'єктів та встановлено фрактальний принцип його формування, який дозволив чисельно оцінити за показником Херста наявність принципа довготривалої пам'яті та характер зміни в часі тренду;

- застосування методу однофакторного макромодельовання, як основи прогнозування електричного навантаження об'єктів КПЖ призначення, який

відрізняється від існуючих методів використанням дискретних автономних макромоделей, і може бути застосований для моделювання і короткострокового прогнозування добових графіків будинкового електричного навантаження при стабілізації впливу метеорологічних факторів;

– запропоновано метод визначення питомого електричного навантаження жител багатопверхових будинків мікрорайону міста за моделлю математичного сподівання усереднених функцій, який на відміну від чинних нормативних документів, дозволяє наблизити результати обчислення до його реального значення;

– отримав подальший розвиток метод оцінки впливу вищих гармонік, які генеруються ЕП з нелінійними характеристиками на електричне навантаження струмопровідних частин шляхом моделювання за сплайн-інтерполяцією процесів в електричній мережі;

– розвинена методика прогнозування ефективності застосування гібридних сонячних колекторів для енергозабезпечення КПЖ об'єктів, що відрізняється від інших урахуванням цін на енергетичному ринку та визначенням дисконтованого прибутку і строку окупності інвестиційного проекту.

4. Практична цінність отриманих результатів дисертаційної роботи

Результати дисертаційної роботи впровадженні у наукові дослідження та проектну практику АТ «Одесаобленерго», Південним РЕМ, ТОВ «С-інжиніринг», рекомендовані до впровадження Центром трансферу технологій ОНПУ, ТОВ «Електротехніка – нові технології», ТОВ «СТАР ЕНЕРЖІ», Науково-виробничою лабораторією «SOLAR PLEX» та ін.

Основні положення, рекомендації та висновки дисертації використовуються у навчальному процесі кафедрою «Електропостачання та енергетичний менеджмент», іншими кафедрами Одеського національного політехнічного інституту під час лекцій, лабораторних та практичних занять, курсового проектування з дисциплін «Основи електропостачання», «Системи електропостачання», «Особливості електропостачання об'єктів житлово-комунального господарства», «Електропостачання цивільних об'єктів».

5. Повнота викладення наукових положень, висновків і рекомендацій в опублікованих працях

За темою дисертації опубліковано 34 наукові праці, з яких: 6 – у журналах, які індексуються у наукометричній базі Scopus, 4 – у періодичних наукових виданнях інших держав, 21 – у наукових журналах, що внесені до переліку наукових фахових видань України, 2 – у навчальних посібниках науково-дослідного характеру з грифом МОН України, патенті на винахід, а також у 12 доповідях на Міжнародних і Республіканських форумах та науково-практичних конференціях, семінарах, в яких достатньо повно викладені наукові положення, висновки і рекомендації дисертаційної роботи.

Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 4-й Міжнародній конференції «Управління енерговикористанням», Одеса, 2001 р., 6-й Міжнародній науково-технічній конференції «Ефективність та якість електропостачання промислових та комунальних підприємств», м. Маріуполь, 2008 р., Міжнародному багатогалузевому науково-технічному форумі «Engineering Strategy in Innovation», м. Одеса, 2009 р., Всеукраїнській науково-практичній конференції «Проблеми енергоефективності та енергозбереження», Кіровоград, 2012 р., Республіканській науково-практичній конференції «Інтелектуальні системи управління енергоспоживанням», м. Одеса, 2013 р., Республіканській науково-технічній конференції «Проблеми енергоефективності в ЖКГ», Одеса, 2014 р., Міжнародній конференції «Сонячні електростанції в системі міського господарства», Одеса, 2016 р., Республіканській науково-технічній конференції «Енергоефективність в ЖКГ», Одеса, 2017 р., Міжнародній конференції «Проблеми сучасної електротехніки – 2018», Інститут електродинаміки, Київ, 4–8 червня, 2018 р., Міжнародній науково-практичній конференції «Електротехнічні та комп'ютерні системи: теорія і практика», Одеса, 4–6 червня, 2019 р.

В авторефераті повністю відображаються сутність дисертаційної роботи, основні результати досліджень, висновки та рекомендації.

6. Зауваження

1. Незрозумілою є необхідність використання в назві, текстах дисертації і автореферату терміну «цивільний». За офіційно прийнятою в електроенергетиці України градацією розрізняють електроспоживання промисловістю, комунально-побутовим сектором і населенням. Якщо автор дисертації заради скорочення об'єднав дві останні групи споживачів електроенергії терміном «цивільний», то це треба було б зазначити в текстах дисертації та автореферату.

2. Незрозуміло, яким чином в графіках електричного навантаження показник Херста виявляє властивості довготривалої пам'яті, її глибини та трендостійкості?

3. На стор. 138 дисертації наводиться обчислення розрахунків потужності чотирьох ліфтів 9-поверхового 144-квартирного будинку згідно Державних будівельних норм (ДБН) і результат порівнюється з фактичною її величиною. Незрозуміло, в чому причина такої значної різниці в результатах, яка більша, ніж в 10 разів?

4. В розділі 4 дисертації й на стор. 16-17 автореферату нечітко описаний метод макромодельовання. Можна зробити висновок, що він є однофакторним. Незрозуміло, яким чином він удосконалений автором дисертації (пункт 3 наукової новизни на стор. 3 автореферату), в чому його «здатність надавати адекватну (невідомо яку?) інформацію і як він може оцінювати місячну й сезонну динаміку електричного навантаження без врахування в явному вигляді метеорологічних факторів, які нестаціонарно змінюються в часі?

5. До формул 4.67, 4.68 (стор. 192 дисертації) надано пояснення, що « $f(\cdot)$, $g(\cdot)$ – вектор функції...». Незрозуміло, як вони підбираються за допомогою оптимізаційних алгоритмів прихованого шару. Мається на увазі, що для цього використовується штучна нейронна мережа?

6. Чим пояснюється (рис. 4.30 дисертації), що величина електроспоживання на четвертому, п'ятому тижні 216-квартирним будинком за реакцією макромоделі на вхідну інформацію є більшою за інші періоди 2017 року?

7. Яким чином дискретні однофакторні макромоделі, які використовуються як основа прогнозування, можна застосовувати для багатфакторного прогнозування з горизонтом упередження від 1 до 7 діб?

8. В розділі 4 дисертації наведена побудована математична модель із застосуванням методу дисперсійного аналізу оцінки впливу на електричне навантаження таких факторів як температура повітря та світлова тривалість доби. Однак така оцінка може бути тільки приблизною, тому що дисперсійний аналіз застосовується для випадкових величин, а температура повітря нестационарно змінюється в часі.

9. В дисертаційній роботі, нажаль, відсутні дослідження, які присвячені наявності додаткових втрат електроенергії від несиметричного завантаження фаз трифазних будинкових електричних мереж.

10. Дані, наведені в таблиці 4 автореферату (табл. 4.5 дисертації) дуже приблизно на даний час відображають залежність електроспоживання від кількості кімнат, мешканців в квартирах, не враховують наявність в квартирах обладнання старого типу або обладнання з електрозаощадженням, тарифу на електроенергію, економічного стану мешканців та інших існуючих факторів.

11. В дисертації відображено існуючий наразі стан функціонування електроспоживачів, які досліджувались в умовах часткової неповноти й в ряді випадків недостовірності вихідної інформації, тому, на мій погляд, доцільно було б додатково в дисертації навести пропозиції автора по збільшенню інформатизації та автоматизації об'єктів, які досліджувались з точки зору застосування Smart Grid технологій.

Зазначенні зауваження не є принциповими і не впливають на загальну позитивну оцінку дисертаційної роботи здобувача Бондарчука А. С.

7. Висновки

Дисертаційна робота Бондарчука А. С. є завершеною науковою працею, в якій отримано нові науково обґрунтовані результати, що вирішують актуальну науково-прикладну проблему – створення методів і моделей підвищення рівня достовірності визначення та прогнозування електричного навантаження цивільних об'єктів.

Дисертаційна робота за актуальністю теми, обґрунтованістю та достовірністю наукових положень, новизною досліджень і практичною

цінністю отриманих результатів відповідає вимогам п. п. 9, 10, 12 «Порядку присудження наукових ступенів», затвердженого постановою Кабінету міністрів України № 567 від 24.07.2013 р., зі змінами, затвердженими постановою Кабінету Міністрів України № 656 від 19.08.2015 р., а її автор, Бондарчук Анатолій Сергійович, заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи.

Доктор технічних наук, професор,
провідний науковий співробітник
відділу моделювання
електроенергетичних об'єктів та систем
Інституту електродинаміки НАН України


Черненко П. О.


Зав. відділу Давиденко Т. О.