

Національний університет «Львівська політехніка»

На правах рукопису

**Бондарчук Анатолій Сергійович**



УДК 621.316.1:658.262(043.5)

**МЕТОДИ І МОДЕЛІ ВИЗНАЧЕННЯ  
ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЦИВІЛЬНИХ ОБ'ЄКТІВ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ГРАФІЧНОГО І МАКРОМОДЕЛЮВАННЯ  
ТА ФРАКТАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

05.14.02 – електричні станції, мережі і системи

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

Львів – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Одеському національному політехнічному університеті Міністерства освіти і науки України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор  
**Лежнюк Петро Дем'янович**,  
завідувач кафедри електричних станцій і систем  
Вінницького національного технічного університету

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Варецький Юрій Омелянович**,  
професор кафедри електроенергетики та  
систем управління Національного університету  
«Львівська політехніка»

доктор технічних наук, професор  
**Говоров Пилип Парамонович**,  
завідувач кафедри світлотехніки і джерел світла  
Харківського національного університету  
міського господарства

доктор технічних наук, професор  
**Черненко Павло Олексійович**,  
провідний науковий співробітник відділу  
моделювання електроенергетичних об'єктів та систем  
Інституту електродинаміки НАН України

Захист відбудеться « 15 » травня 2020 року о 10.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.02 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: головний корпус університету, ауд. 226, вул. С. Бандери, 12, м. Львів, 79013.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» (м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 р.

Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради Д 35.052.02



В. І. Коруд

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Нові ринкові умови в електроенергетиці, такі як необхідність підвищення енергоефективності систем електропостачання, інновація та конкуренція, вимагають більш точного визначення споживаної та згенерованої електроенергії. Зокрема, проблема підвищення рівня достовірності визначення електричного навантаження цивільних об'єктів потребує новітнього підходу до його обчислення з урахуванням режимів роботи, нелінійності характеристик електроприймачів (ЕП) та генерування ними електромагнітних завад, застосування відновлювальних джерел енергії, оскільки використання чинних нормативних документів призводить до перевищення фактичного навантаження від 1,5 до 3,5 разів, про що свідчать результати проведених досліджень.

За останні роки спостерігається зростання темпів проектування та будівництва цивільних об'єктів, при цьому їх об'єм споживання електроенергії досяг рівня промислових підприємств. Ураховуючи зазначене, актуальним є розроблення методів і моделей для достовірного визначення електричного навантаження цивільних об'єктів на стадії проектування, що дозволить стимулювати економію енергоресурсів, капітальних витрат на спорудження й експлуатацію систем електропостачання (СЕР), зменшення негативного впливу на навколишнє середовище.

Значний вклад у розвиток теорії та практики щодо сучасних стандартів з проектування та експлуатації систем електропостачання міст, промислових підприємств, цивільних об'єктів внесли такі провідні вчені, як Шидловський А. К., Кириленко О. В., Праховник А. В., Винославський В. М., Півняк Г. Г., Випанасенко С. І., Варецький Ю. О., Говоров П. П., Денисюк С. П., Макоклюєв Б. І., Павловський В. В., Розен В. П., Качан Ю. Г., Стахів П. Г., Лежнюк П. Д., Бурбело М. Й., Маліновський А. А., Фомічов Є. П., Черненко П. О. та ін.

Впливу вищих гармонік на якість електричної енергії присвячено чимало досліджень та публікацій у наукових журналах, фундаментальних монографіях таких учених, як Жежеленка І. В., Шидловського А. К., Кириленка О. В., Кузнецова В. Г., Півняка Г. Г., Саєнка Ю. Л., Курінного Е. Г. Результати їх досліджень містять глибоко розроблені теоретичні та практичні питання щодо електромагнітної сумісності в системах електропостачання.

Перші дослідження щодо прогнозування електроспоживання з'явилися в середині попереднього століття. Значний внесок у сферу прогнозування електроспоживання промислових підприємств, об'єктів цивільного призначення внесли такі вчені, як Гордєєв В. І., Єрмілов О. О., Федоров А. А., Праховник А. В., Волобрінський С. Д., Гурський С. К., Лежнюк П. Д., Макоклюєв Б. І., Розен В. П., Рогальський Б. С., Стахів П. Г., Тимченко В. Ф., Черненко П. О.

У дисертаційній роботі проаналізовано накопичений досвід щодо проблеми достовірного визначення та прогнозування розрахункових електричних навантажень, запропоновано методи уникнення значних розходжень між результатами визначення за чинних нормативних документів і фактичного електричного навантаження СЕР об'єктів цивільного призначення.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано на кафедрі «Електропостачання та енергетичний менеджмент»

Інституту електромеханіки та енергоменеджменту Одеського національного політехнічного університету відповідно до пріоритетних напрямів виконання Держбюджетних науково-дослідних робіт Міністерства освіти і науки України у 2007–2011 рр. за № 594-55, О107U011227 «Дослідження режимів енергоспоживання промислових і комунальних підприємств, розробка заходів підвищення їх ефективності в стратегії сталого розвитку». У 2012–2016 рр. за № 78-53, О113U001466 «Енергетичний аналіз і поліпшення енергетичної результативності функціонування підприємств, установ, будинків, устаткування, систем і процесів у концепції сталої енергетики», за якими здобувач був виконавцем окремих розділів, що містили розробку ним моделей електричного навантаження об'єктів цивільного призначення, методів визначення його параметрів на всіх рівнях електропостачання, способів зменшення максимального навантаження та заходів з енергоресурсозаощадження і захисту навколишнього середовища.

**Мета та завдання дослідження** полягає у вирішенні важливої науково-практичної проблеми – розроблення методів і моделей підвищення рівня достовірності визначення електричного навантаження цивільних об'єктів, що дозволить на стадії проєктування створювати умови економії енергетичних і матеріальних ресурсів у процесі спорудження та експлуатації СЕП.

Для досягнення поставленої мети в роботі розв'язано такі завдання:

- виконати аналіз нормативних документів, існуючих методів і моделей щодо визначення електричного навантаження цивільних об'єктів, виявити негативні фактори, що призводять до значних розходжень з його реальним значенням;
- розробити методи і моделі для достовірного визначення електричного навантаження об'єктів цивільного призначення шляхом графічного синтезу динаміки його складових з використанням теорії сплайнів;
- застосувати метод макромодельовання електричного навантаження для цивільних об'єктів з використанням дискретних автономних макромоделей, що не потребують попередньої обробки апріорної інформації;
- довести фрактальний принцип формування електричного навантаження цивільних об'єктів на основі результатів R/S-аналізу апріорної інформації, як інструменту оцінювання наявності довготривалої пам'яті та трендостійкості;
- розробити метод оцінювання електричного, теплового навантаження на струмовідні частини систем електропостачання цивільних об'єктів під впливом генерації вищих гармонік ЕП з нелінійними характеристиками та мережевих інверторів;
- дослідити ефективність застосування результатів розроблених методів та моделей щодо визначення електричного навантаження з перевіркою їх достовірності на реальних СЕП об'єктів цивільного призначення;
- розвинути методіку прогнозування ефективності застосування гібридних сонячних колекторів для енергозабезпечення цивільних об'єктів.

**Об'єктом дослідження** є динамічні режими і процеси електричного навантаження в системах електропостачання цивільних об'єктів.

**Предметом дослідження** є методи і моделі визначення електричного навантаження систем електропостачання цивільних об'єктів.

**Методи дослідження** базуються на використанні теорії ймовірності при аналітичному визначенні електричного навантаження, методів математичної статистики визначення питомого електричного навантаження, кореляційного, регресійного, дисперсійного аналізу, експертного опитування, теорії сплайнів, математичного макро- і графічного моделювання, його фрактальних властивостей при аналізі динаміки та прогнозуванні електричного навантаження, електроспоживання, експериментальних досліджень на реальних СЕП цивільних об'єктів.

**Наукова новизна отриманих результатів дослідження** полягає у теоретичному узагальненні та вирішенні важливої науково-практичної проблеми в галузі науки і техніки щодо дослідження динамічних режимів і електричних процесів у СЕП, математичного моделювання та достовірного визначення електричного навантаження шляхом розроблення методів і моделей, що дозволило вирішити проблему підвищення рівня достовірності визначення і прогнозування електричного навантаження СЕП об'єктів цивільного призначення.

Новизною проведених досліджень вважаються такі наукові результати:

– створено концептуально новий метод розрахунку електричного навантаження цивільних об'єктів шляхом графічного синтезу динаміки його складових з використанням моделювання на основі теорії сплайнів, який дозволив у 1,5–3,5 разів підвищити достовірність його визначення, порівняно з обчисленням за чинними нормативними показниками, що підтверджено експериментально на реальних об'єктах;

– вперше доведена самоафінність структури електричного навантаження цивільних об'єктів та встановлено за методом R/S-аналізу апріорної інформації фрактальний принцип його формування, який дозволив чисельно оцінити за показником Херста наявність довготривалої пам'яті та її глибину, трендостійкість для прогнозування електричного навантаження, електроспоживання;

– отримав подальший розвиток метод макромоделювання електричного навантаження об'єктів цивільного призначення, який відрізняється від існуючих методів використанням дискретних автономних макромоделей, що не потребують попередньої обробки апріорної інформації та дозволив пришвидшити процес моделювання;

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

– отримав подальшого розвитку метод оцінки впливу вищих гармонік, які генеруються ЕП з нелінійними характеристиками, джерелами відновлювальної енергії за наявності інверторів, на електричне, теплове навантаження струмовідних частин шляхом моделювання за сплайн-інтерполяцією процесів в електричній мережі, що дозволяє передбачати кризові ситуації при експлуатації;

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

**Практичне значення отриманих результатів дисертаційної роботи** полягає у вирішенні значимої науково-практичної проблеми в галузі науки і техніки – створення методів і моделей, які дозволили підвищити достовірність визначення електричного навантаження цивільних об'єктів, що стимулює економію матеріальних та енергетичних ресурсів у процесі будівництва та експлуатації СЕП. При цьому надано оцінку ефективності їх застосування, виявлено значне завищення навантаження, обчисленого за чинними нормативними документами. Основні положення, рекомендації та висновки дисертації оприлюднені в наукових журналах, втілюються у навчальний процес кафедрою «Електропостачання та енергетичний менеджмент», іншими кафедрами ОНПУ 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», у кваліфікаційних роботах бакалаврів та у науково-дослідних роботах магістрів, аспірантів. 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.

**Особистий внесок здобувача.** Наукові результати, які викладено в дисертаційній роботі, отримано автором особисто. У друкованих наукових працях, що оприлюднені у співавторстві, автору належать такі результати: застосування графічного методу для оцінювання ефекту цільового зрівнювання графіка електричного навантаження міста [18]; запропоновано метод моделювання за сплайн-інтерполяцією навантаження міських мереж для визначення ефективності запровадження диференційованого тарифу [21]; застосовано ймовірно-статистичний та графічний методи зіставлення теоретичного і реального питомого електричного навантаження жител [7, 23]; запропоновано визначення впливу регіонального потепління на енергоспоживання за регресійним аналізом динаміки середньорічної температури довкілля міста [24]; проведення експериментального дослідження та аналіз, за кореляційним аналізом, впливу побутових ЕП на комерційні показання лічильників [27]; створено математичні моделі та їх реалізація щодо підвищення рівня достовірності визначення навантаження цивільних об'єктів [31]; застосування макромодельовання [6], фрактального [4, 9] аналізу для прогнозування електричного навантаження цивільних об'єктів; запропоновано метод розрахунку та оцінювання прогнозованої ефективності застосування гібридних сонячних колекторів для енергозабезпечення цивільних об'єктів, визначені розміри вкладень і прибутків мешканців за результатами реалізації таких інноваційних проєктів [8, 10].

**Апробація результатів 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 енергоефек-

тивності 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.

**Публікації.** 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 з грифом МОН України, патенти на винахід, а також у 12 доповідях на Міжнародних і Республіканських форумах та науково-практичних конференціях, семінарах.

**Структура дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота 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 з 176 найменувань на 22 сторінках та 6 додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**Вступ** містить загальну характеристику роботи, яка обґрунтовує її актуальність і важливість, розкриває мету і завдання досліджень, наукову новизну й практичне значення отриманих результатів.

**Розділ 1** містить результати аналізу існуючих методів визначення електричного навантаження, які свідчать про те, що вони базуються на використанні коефіцієнтів розрахункового навантаження за рівнями електропостачання, методу упорядкованих діаграм, статистичного, універсального методів та інших, які використовуються для розрахунку навантажень промислових підприємств. До основних методів прогнозування можна віднести такі, як адитивні, нелінійні регресійні моделі, теорії нечітких множин, штучних нейронних мереж, побудованих на основі макромоделювання, фрактального аналізу та ін. Достатньо глибока увага приділяється оперативному прогнозуванню, для якого використовують, як правило, метод еталонного графіка. При цьому за основу беруться типові графіки, усереднені за певний проміжок часу значення електричного навантаження. Під час отримання нових даних, що впливають на його динаміку як, наприклад, температура довкілля, тривалість світлої частини доби, швидкість вітру, такий графік коригується. Використовується макромоделювання як основа прогнозування електроспоживання, що дозволяє розробляти детерміністичні автономні макромоделі електроспоживання на базі апріорних даних без використання процедур попередньої обробки первинної інформації. Останнім часом застосовуються напрацьовані фрактальних множин і фрактальної геометрії у сфері прогнозування електрич-

них навантажень. Сутність такого прогнозу в тому, що традиційна геометрія з прямими лініями і гладкими поверхнями не завжди підходить для опису будь-якого об'єкта, процесу. Для цього пропонується використовувати самоафінні структури – фрактали, кожна частина якої повторює у своєму розвитку розвиток усієї моделі в цілому.

Разом із тим, розрахунки електричного навантаження, зіставлення теоретичних обчислень і прогнозів з реальним його значенням об'єктів цивільного призначення, житлових мікрорайонів міста, у наукових працях недостатньо висвітлено, на відміну від існуючих численних досліджень щодо навантаження електроенергетичних систем та промислових підприємств.

За чинними нормативними документами, тобто Державними будівельними нормами (ДБН), методи визначення розрахункового навантаження об'єктів цивільного призначення на стадії проєктування представлені так.

Для визначення розрахункового навантаження ДБН передбачають використання коефіцієнта попиту, питомого навантаження на одиницю площі, кВт/м<sup>2</sup>, 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.

Розрахункове навантаження групи жител з однаковим питомим навантаженням, приведене до лінії живлення, вводу в житловий будинок, обчислюються так:

$$P_{р.ж} = p_{п.р.ж} N, \quad (1)$$

де  $p_{п.р.ж}$  – питома розрахункове активне електричне навантаження житла, яке вибирається залежно від прийнятого рівня електрифікації та кількості жител  $N$ .

Усереднений максимум електричних навантажень ЕП житла, який приведений до його вводу, визначається за формулою

$$P_{макс} = \bar{K}_{п1} p_{уст1} + \bar{K}_{п2} p_{уст2} + \dots + \bar{K}_{пn} p_{устn}, \quad (2)$$

де  $\bar{K}_{п1}, \bar{K}_{п2}, \dots, \bar{K}_{пn}$  – середні коефіцієнти попиту або середні ймовірності увімкнення ЕП під час максимуму електричного навантаження;  $p_{уст1}, p_{уст2}, \dots, p_{устn}$  – установлена (умовна) активна потужність ЕП.

У разі приєднання об'єктів різного призначення (житлових, комунальних) до лінії, вводу, підсумкове розрахункове навантаження визначається за формулою

$$P_{р\Sigma} = P_{р.макс} + K_1 P_{р1} + K_2 P_{р2} + \dots + K_n P_{рn}, \quad (3)$$

де  $P_{р.макс}$  – розрахункове електричне навантаження найбільше від усіх об'єктів, що приєднуються до загальної точки мережі;  $K_1, K_2, \dots, K_n$  – коефіцієнти участі максимумів навантаження  $n$ -го і максимального за навантаженням об'єкта.



За методом теорії ймовірності і математичної статистики доведено, що формування електричного навантаження ЕП з достатнім ступенем достовірності підкоряється біноміальному закону розподілення, при цьому ймовірність того, що із загальної їх кількості  $n$  одночасно увімкнено  $m$ , визначається за формулою

$$P_{r(m,n)} = \frac{1}{\sqrt{2\pi n \bar{K}_n (1 - \bar{K}_n)}} \int_0^m e^{\frac{-(m-n\bar{K}_n)^2}{2n\bar{K}_n(1-\bar{K}_n)}} dm. \quad (4)$$

За спрощеною формулою для кількості  $m$  ЕП із загальної кількості  $n$ , які можуть бути увімкнені

$$m = n\bar{K}_n + t_\alpha \sqrt{n\bar{K}_n(1-\bar{K}_n)}, \quad (5)$$

де  $t_\alpha$  – нормоване відхилення за гаусовим законом розподілу.

Розподіл електричного навантаження, приведеного до вводу в житлові будинки, відповідає нормальному закону, звідки максимум навантаження

$$P_{\text{макс}} = \bar{P}_{\text{макс}} + t_\alpha \sigma, \quad (6)$$

де  $\bar{P}_{\text{макс}}$  – середнє максимальне електричне навантаження;  $\sigma$  – середньоквадратичне відхилення.

Розрахункове електричне навантаження від групи жител (квартир, котеджів) з різними питомими навантаженнями, яке приведене до лінії живлення, вводу в житловий будинок, визначається за формулою

$$P_{\text{пріз}} = (p_{\text{п}_1} - p_{\text{п}_i}) N_1 K_{\text{од}_1} + (p_{\text{п}_2} - p_{\text{п}_i}) N_2 K_{\text{од}_{(1+2)}} + \dots + (p_{\text{п}_{(i-1)}} - p_{\text{п}_i}) N_{(i-1)} K_{\text{од}_{(1+2+\dots+(i-1))}} + p_{\text{п}_i} (N_1 + N_2 + \dots + N_i) K_{\text{од}_{(1+2+\dots+i)}}. \quad (7)$$

Таким чином, при проектуванні СЕП розрахункові електричні навантаження цивільних об'єктів визначаються, в основному, за Державними будівельними нормами, відповідність яких фактичним навантаженням перевірятимуться дослідженням.

**Розділ 2** містить результати дослідження особливостей технічних характеристик традиційних та відновлювальних джерел енергії, оскільки кожне з них по своєму впливає на формування навантаження об'єктів цивільного призначення.

*Традиційна система електропостачання*, під якою розуміється живлення цивільних об'єктів від енергосистеми, яка найбільш поширена, навіть за наявності ряду недоліків таких, як неефективне використання вичерпного вартісного викопного палива, антропогенний вплив на довкілля та інших, порівняно з новими технологіями розосередженого генерування різних видів енергії. Однак у традиційній системі все більше виявляється спотворення синусоїдності кривої за напругою з різних причин, яке збільшує величину навантаження (рис. 1).

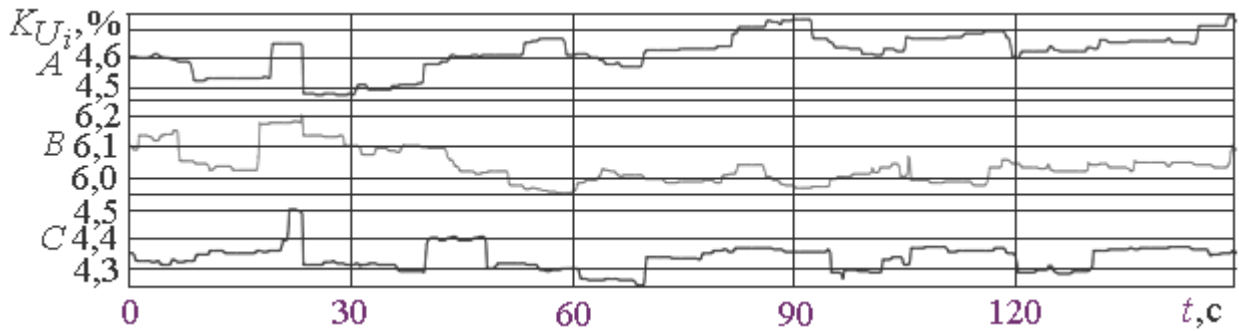


Рисунок 1 – Результат виміру 15.03.2017 р. усередненої несинусоїдності за напругою від традиційного джерела на вводі в 144-квартирний будинок

*Мережеві сонячні електростанції*, які безпосередньо приєднуються до міської електричної мережі цивільного об'єкта, знаходять все більше застосування як відновлювальні джерела живлення, що екологічно «чисті» за виробленням електроенергії. Однак вони виявляються генераторами вищих гармонік в елементах СЕП через наявність інверторів, що детально викладено у розділі 6.

*Гібридна система електропостачання*, під якою розуміється сумісна робота різних джерел електроенергії, що забезпечують енергозаощаджувальне живлення, однак вони можуть містити джерело електромагнітного збурення в системі. Інтерактивна взаємодія інвертора цієї системи з мережею дозволяє мінімізувати електроспоживання від централізованого джерела або додавати електроенергію до споживачів від акумуляторних батарей, відновлювальних джерел, таких як гібридні сонячні колектори, що спроможні одночасно генерувати як електричну, так і теплову енергію, без їх вимкнення від електричних та теплових мереж міста.

*Інтегрована система та джерела розосередженої енергії*, що об'єднує між собою різні джерела енергії і споживачів в єдину технологічну систему – є новою стратегією розвитку європейських енергетичних мереж за архітектурою. Особлива увага до розосередженої генерації пов'язана із жорсткішим законодавством ряду країн відносно шкідливих викидів у навколишнє середовище і подальшою лібералізацією енергоринків. Але такі системи не виключають генерацію вищих гармонік в електричну мережу.

**Розділ 3** присвячено експериментальному моделюванню та аналізу графіків електричних навантажень об'єктів цивільного призначення, яке виконувалося на основі інформації АСКОЕ, аналізатора якості електроенергії ELSPEC G4500 BLACKBOX, що реєструють та ефективно обробляють отримані дані.

Наприклад, динаміку активної потужності кондиціонера типу Sensei ECO-i FTE-23MR за період роботи протягом однієї години, за режимом опалення приміщення площею 16 м<sup>2</sup> з підтриманням температури +25°C, за початкової +17°C, зовнішньої +8°C, наведено на рис. 2. Значення споживаної активної електроенергії кондиціонером за час  $T$  визначається так:

$$W_{\text{а.конд}} = \int_0^T p(t) dt = \int_0^{3600} p(t) dt = 0,754 \text{ кВт} \cdot \text{год.} \quad (8)$$

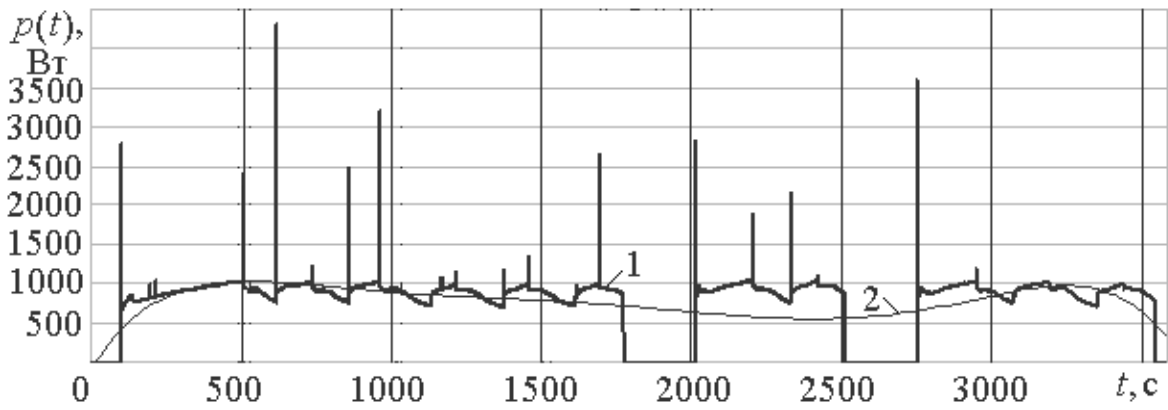


Рисунок 2 – Динаміка (1) та лінія тренда (2) активної потужності побутового кондиціонера типу Sensei ECO-i FTE-23MR

Динаміку потужності пральної машини за повний цикл прання наведено на рис. 3.

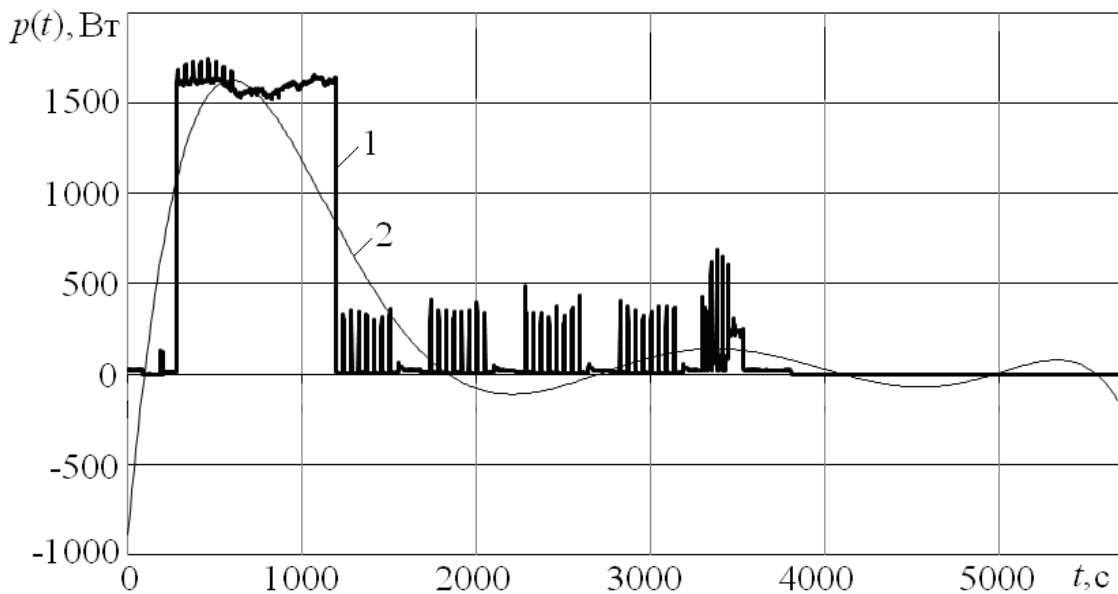


Рисунок 3 – Динаміка (1) та лінія тренда (2) активного навантаження пральної машини Electrolux за цикл прання

Аналіз графіків навантаження ЕП цивільних об'єктів за достатньо малої дискретизації (мс, с, хв.) свідчить про складність процесів в електричній мережі, які визначають динаміку електричних навантажень.

**Розділ 4** містить результати розробки методів і моделей визначення електричного навантаження цивільних об'єктів з використанням графічного і макромодування та його фрактальних властивостей.

Для прикладу, за моделлю електричного навантаження на рис. 4, визначається розрахункова активна потужність побутового холодильника ARC 4020 фірми Whirlpool за цикл роботи протягом 5 годин, за середньої температури середовища у приміщенні +24°C.

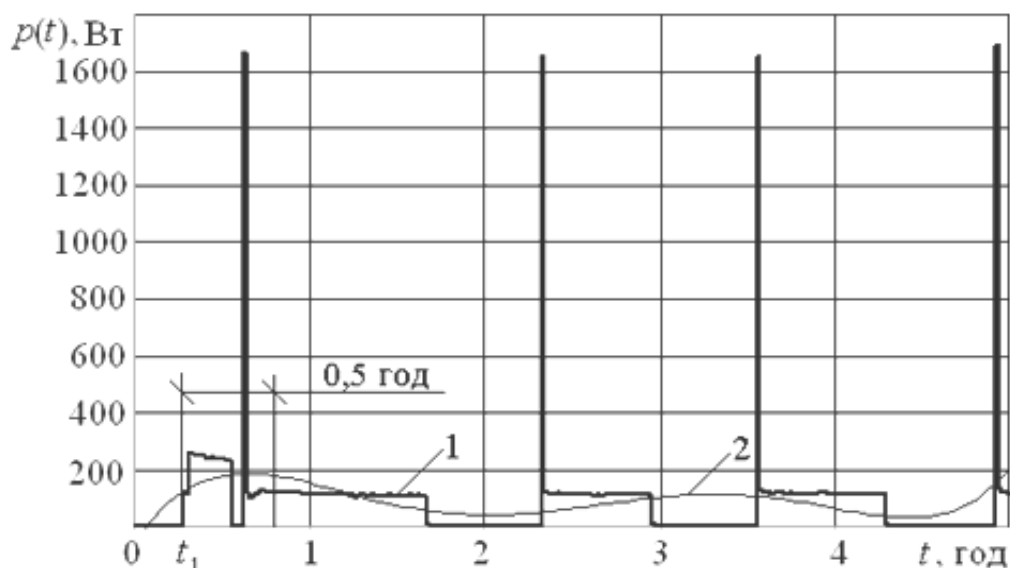


Рисунок 4 – Динаміка (1) та лінія тренда (2) активної електричної потужності за цикл роботи побутового холодильника ARC 4020 фірми Whirlpool

За параметрами графіка розрахункова потужність становитиме:

$$P_{p.x} = \frac{1}{0,5} \int_{t_1}^{t_1+0,5} p_x(t) dt = 153 \text{ Вт.} \quad (9)$$

Аналогічно за попереднім прикладом, графічно за теорією сплайнів визначаються величини розрахункового і середнього активного навантаження кожного ЕП та підсумкового по житлу з газовою плитою за параметрами їх графіків, режимів роботи, окремі з яких наведені в розділі 3 та за даними в табл. 1, 2.

Таблиця 1

Вихідні та розрахункові дані щодо електроприймачів житла

Вихідні дані			Розрахункові дані	
Найменування ЕП житла	Тип, марка	$P_{уст}, \text{ Вт}$	$P_p, \text{ Вт}$	$P_{сер}, \text{ Вт}$
Холодильник	Whirlpool	144	153	68
Бойлер	Thermex	1500	1470	1470
Телевізор	SAMSUNG	70	57	57
Пральна машина	Elektrolux	2200	828	420
Праска	BRAUN	1900	633	435
Освітлення	КЛЛ	5×20	93,5	93,5
Освітлення	ЛР	6×60	294	294
Комп'ютер	Настільний	75	60	60
Кондиціонер	Sensei	880	630	610
Електрочайник (3 хв.)	TEFAL	2000	89	89
Мікрохвильова піч (7 хв.)	Samsung	850	99,2	99,2
Всього		10079	4406,7	3695,7

Режими роботи побутових електроприймачів житла

Найменування електроприймачів	Час увімкнення електроприймачів, год, хв.	Час вимкнення електроприймачів, год,хв.
Освітлення	17.20	–
Холодильник	17.20	–
ПК настільний	17.23	–
Пральна машина	17.23	18.30
Телевізор	17.36	–
Кондиціонер	17.53	–
Електрочайник (1 л)	18.06	18.09
Праска	18.16	18.28
Мікрохвильова піч	18.51	18.56
Бойлер	18.58	19.48
Пральна машина	19.49	20.49
Електрочайник (1 л)	20.35	20.38
Мікрохвильова піч	20.41	20.46
Праска	20.47	21.10

Динаміка виміряного за аналізатором якості електричного навантаження Els-рес G4500 на ввіді житла з газовою плитою наведена на рис. 5.

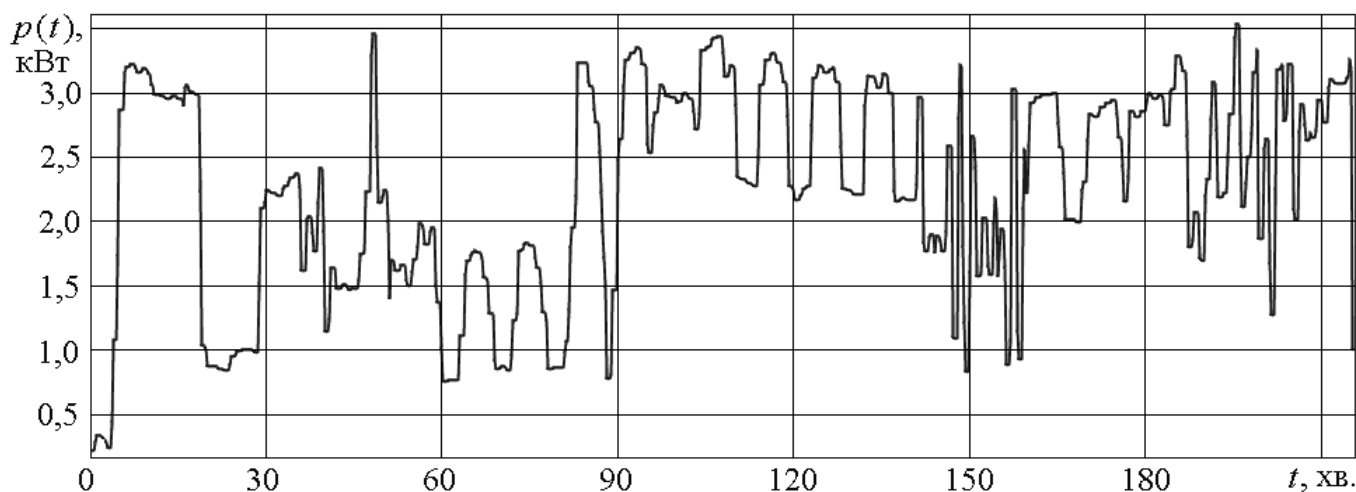


Рисунок 5 – Динаміка електричного навантаження 15.03.2017 р. на ввіді житла з газовою плитою

Максимальне електричне навантаження житла за рис. 5 становить 3,5 кВт, розрахункове – 3,0 кВт,  $\cos\varphi_{\text{ср}} = 0,97$ . За нормативними показниками питоме навантаження житла становить 5 кВт, що перевищує реальне електричне навантаження житла в 1,43 разів.

Здійснене соціологічне опитування мешканців з характерним набором та режимом роботи електроприладів 12 жител житлового 120-квартирного будинку за жовтень місяць 2017 р., результати якого наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вихідні дані щодо ЕП та інших характеристик 12 жител

№ з/п квартири	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Кількість кімнат	3	1	2	3	3	1	2	3	3	1	2	3
Кількість мешканців	4	2	2	3	3	1	2	4	3	1	3	2
Найменування, установлена (умовно) потужність електроприладів, кВт												
Електрочайник	1,5			0,9		1		1,5		1,5		1,5
Праска			1	0,8		0,8		1	1,5			
Пилосос	0,6		0,6	0,6	0,6	0,6		0,6	0,6	0,6		0,6
Пральна машина	2	2		1,8	2	1,9		2,2	2		2	1,9
Мікрохвильова піч				1,2		1,2		1,2	0,9	1,2	1,2	
Комп'ютер			0,15	0,15		0,18	0,2	0,15			0,2	
Телевізор	0,15	0,1	0,1	0,14	0,12	0,13		0,14	0,13	0,15	0,13	0,14
Кондиціонер				0,88				0,88				0,88
Холодильник	0,16	0,2	0,3	0,3	0,2	0,2	0,15	0,3	0,16	0,2	0,15	0,3
Освітлення	0,65	0,3	0,5	0,65	0,65	0,34	0,5	0,65	0,65	0,34	0,5	0,65
Підсумкова потужність ЕП, кВт	5,06	2,6	2,65	7,62	3,37	6,35	0,85	8,62	5,94	3,99	4,18	5,97
Середньодобове електроспоживання за АСКОЕ, кВт·год	15,6	4,2	8,9	11,5	7,6	5,6	2,7	11,2	16,8	3,4	5,3	15,5

За отриманими даними побудовано кореляційну матрицю, яка свідчить про сильний зв'язок між множинами даних: електроспоживанням, кількістю кімнат, мешканців та жител (табл. 4).

Таблиця 4

Кореляційна матриця між множинами даних

Показник	Електро-споживання	Кількість кімнат	Кількість мешканців	Кількість жител	$P_{уст}^{ЕП}$
Електроспоживання	1				
Кількість кімнат	0,988586	1			
Кількість мешканців	0,982336	0,995742	1		
Кількість жител	0,898817	0,902065	0,895197	1	
$P_{уст}^{ЕП}$	0,981596	0,976904	0,959698	0,891941	1

Розглядається приклад знаходження, за використанням теорії сплайнів, питомого електричного навантаження житла за «усередненої» функції для характерних 12 квартир багатоповерхового будинку та порівняння його з нормативними показниками.

Відомо, що сплайн-функція  $s_m(\Delta_n; x)$ , яка визначена на відрізку  $[a, b]$ , збіжна на часткових відрізках  $[x_i, x_{i+1}]$ , утворених сіткою  $\Delta_n: a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$  з алгебраїчними багаточленами степеня не вище  $m$ , і яка має на  $[a, b]$  неперервну  $(m-1)$ -у похідну.

Для сплайна справедливе подання

$$s_m(\Delta_n; x) = P_{m-1}(x) + \sum_{k=0}^{n-1} c_k(x - x_k)^m, \quad (10)$$

де  $P_{m-1}(x)$  – багаточлен степеня не вище  $(m - 1)$ ;  $c_k$  – дійсні числа.

Точки  $x_i$  носять назву вузлів сплайна. Якщо сплайн  $s_m(\Delta_n; x)$  має на відрізку  $[a, b]$  неперервну  $(m - k)$ -у похідну ( $k > 1$ ), а  $(m - k + 1)$  – похідна у вузлах сплайна розривна, то він має дефект  $k$ . Сплайни використовуються для наближення функцій, таких як сплайн-апроксимація, сплайн-інтерполяція.

*Сплайн-інтерполяція* – інтерполювання за допомогою сплайнів, тобто побудова інтерполяційного сплайна, який приймає в заданих точках  $\{x_i\}$  дані значення  $\{f(x_i)\}$ ,  $i = 0, 1, \dots, n$ . Моделювання графіків електричного навантаження ЕП 12 квартир житлового будинку здійснюється за розробленою програмою з використанням вбудованої в MathCAD функції «cspline (x,y)» із продовженням інтерполяційної кривої кубічною параболою, яка має такий вигляд:

$$\begin{aligned} n=25 \quad \text{TO} &:= (0 \ 1 \ 2 \dots \ 22 \ 23 \ 24) \\ \text{P10} &:= (\text{P}_{1.0} \ \text{P}_{1.1} \ \text{P}_{1.2} \dots \ \text{P}_{1.22} \ \text{P}_{1.23} \ \text{P}_{1.24}) \\ \text{P20} &:= (\text{P}_{2.0} \ \text{P}_{2.1} \ \text{P}_{2.2} \dots \ \text{P}_{2.22} \ \text{P}_{2.23} \ \text{P}_{2.24}) \\ &\dots \\ \text{P110} &:= (\text{P}_{11.0} \ \text{P}_{11.1} \ \text{P}_{11.2} \dots \ \text{P}_{11.22} \ \text{P}_{11.23} \ \text{P}_{11.24}) \\ \text{P120} &:= (\text{P}_{12.0} \ \text{P}_{12.1} \ \text{P}_{12.2} \dots \ \text{P}_{12.22} \ \text{P}_{12.23} \ \text{P}_{12.24}) \\ \text{T} &:= \text{T0}^T \quad \text{P1} := \text{P10}^T \quad \text{P2} := \text{P20}^T \quad \dots \quad \text{P11} := \text{P110}^T \quad \text{P12} := \text{P120}^T \quad (11) \\ \text{s11} &:= \text{cspline}(\text{T}, \text{P1}) \quad \text{p1}(t) := \text{interp}(\text{s11}, \text{T}, \text{P1}, t) \\ \text{s12} &:= \text{cspline}(\text{T}, \text{P2}) \quad \text{p2}(t) := \text{interp}(\text{s12}, \text{T}, \text{P2}, t) \\ &\dots \\ \text{s111} &:= \text{cspline}(\text{T}, \text{P11}) \quad \text{p11}(t) := \text{interp}(\text{s111}, \text{T}, \text{P11}, t) \\ \text{s112} &:= \text{cspline}(\text{T}, \text{P12}) \quad \text{p12}(t) := \text{interp}(\text{s112}, \text{T}, \text{P12}, t) \\ \text{t} &:= \min(\text{T}) - 0.1 - 0.01, \min(\text{T}) - 0.1 .. \max(\text{T}) + 0.1 \quad \text{i} := 0 .. n \end{aligned}$$

Математичне очікування, або «усереднена» функція (13 ряд), навколо якої відбувається розкид реалізацій випадкових процесів із електричного навантаження 12 квартир з характерним набором побутових ЕП, наведена на рис. 6.

Розрахункове питоме «усереднене» електричне навантаження 12 квартир, номер яких співпадає з номером ряду за рис. 6, становитиме:

$$P_{\text{пит}} = \frac{1}{0,5} \int_{19,75}^{20,25} P(t) dt = 683 \text{ Вт.} \quad (12)$$

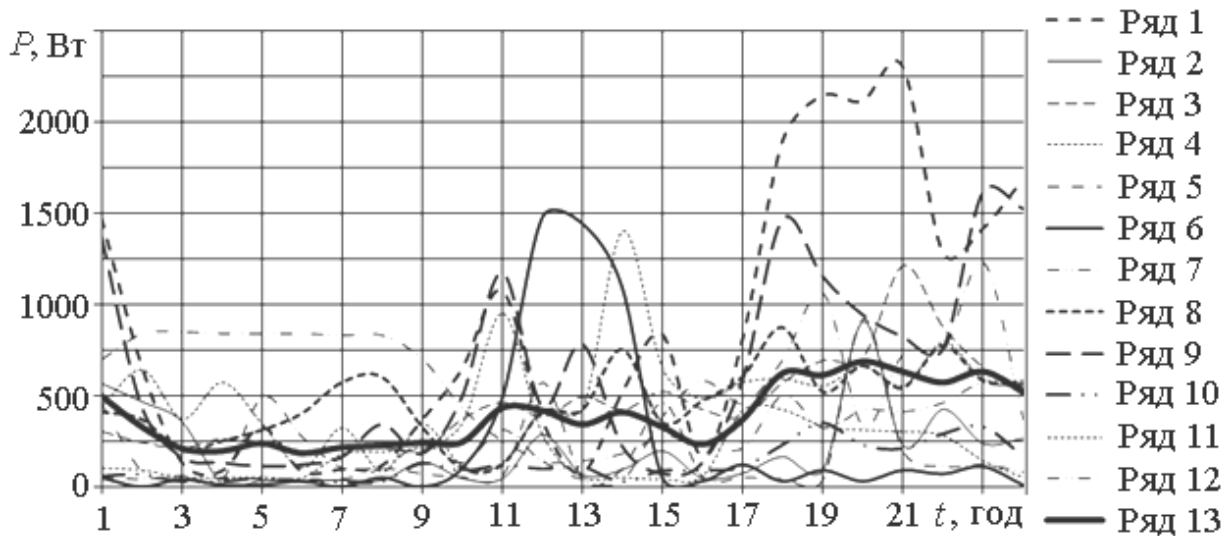


Рисунок 6 – Динаміка добового електричного навантаження кожної з 12 жител за неділю 18.03.2017 р. та «усереднена» функція (13 ряд)

Порівнюючи отримане за графічним моделюванням  $p_{\text{пит}}$  з цим показником за ДБН, відзначаємо, що нормативний показник (2360 Вт) порівняно з визначеним за теорією сплайнів шляхом синтезу графіків, у 3,5 разів збільшений.

Визначається динаміка питомого розрахункового електричного навантаження квартир на прикладі електроспоживання житлового мікрорайону міста, на території якого розташовуються 45 багатоквартирних 9-поверхових будинків, що містять 1938 квартир з газовими плитами.

Динаміку питомого навантаження для 1, 12, 36, 64, 120, 144, 216, 455, 706, 1047, 1458, 1893, 1938 квартир за екстраполяцією від 1000 (за ДБН) до 3000 квартир отриманих за результатами експериментальних вимірювань та моделюванням електричного навантаження на 9-ти ТП–10/0,4 кВ мікрорайону міста, наведено на рис. 7.

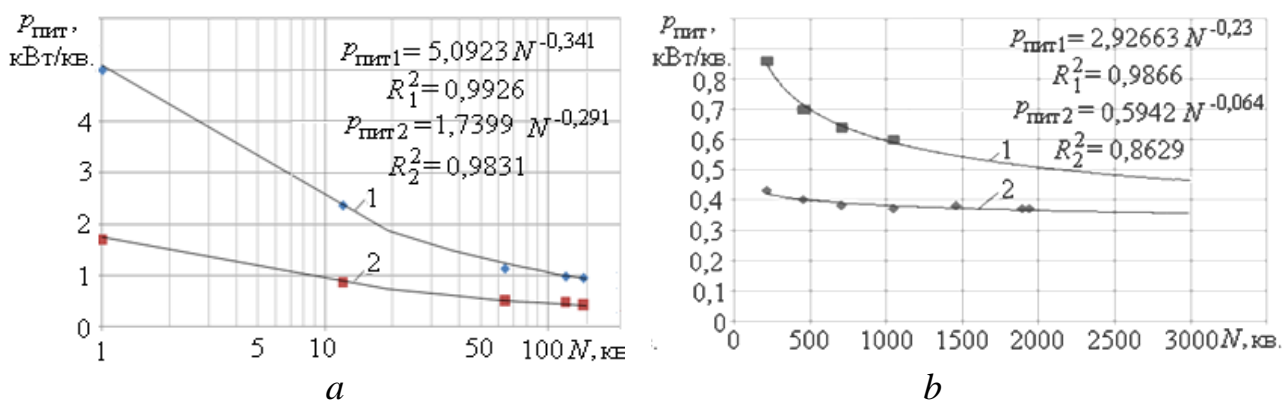


Рисунок 7 – Результат моделювання питомого розрахункового електричного навантаження квартир мікрорайону за: 1– ДБН; 2 – графічного методу

Коефіцієнти детермінації свідчать про високу ступінь адекватності моделей.

Визначене  $p_{\text{пит}}$  (на житло) за нормативами (ДБН) до 1000 квартир, перевищує реальне від 1,5 до 3,5 разів, що підтверджено натурними вимірами у СЕП.



Енергетична, економічна та екологічна ефективність впливу визначеного за нормативами і графічно навантаження 4-х 216-квартирних будинків на вибір потужності живильної двотрансформаторної ТП, яка обчислюється в середовищі MathCad. Визначається питоме навантаження житла для будинків за нормативами і графічно за рис. 7 та будуються відповідні графіки навантаження (рис. 8).

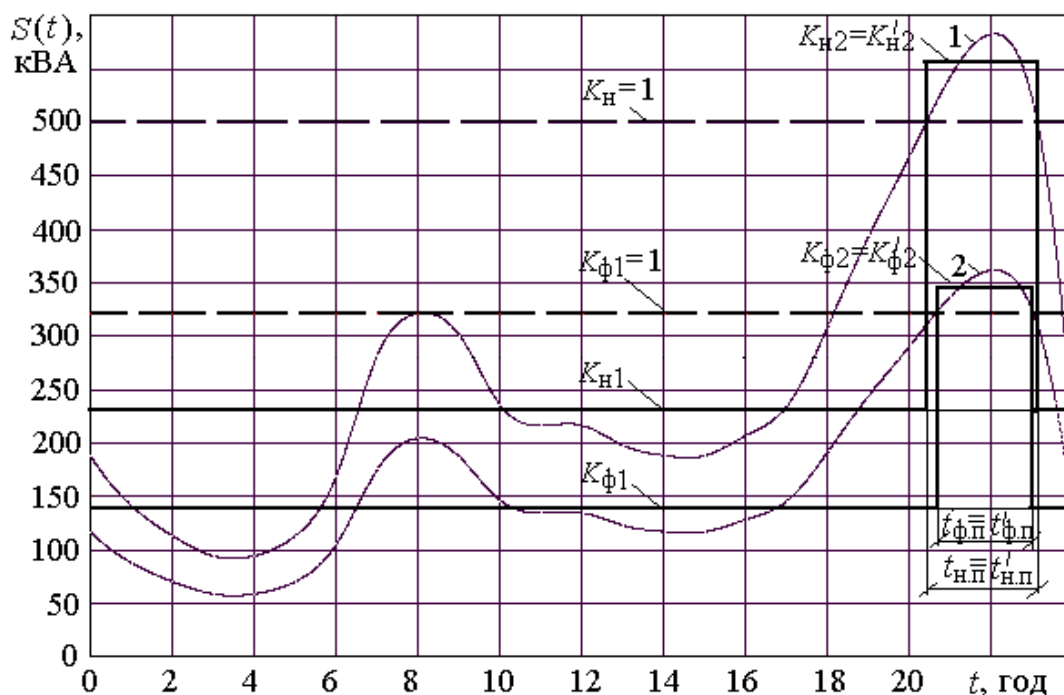


Рисунок 8 – Результат побудови графіків навантаження будинків за ДБН (1) і графічно (2) за 20.12.2017 р. та перетворення їх в еквівалентні двоступінчасті

За нормативами розрахункове навантаження 4-х будинків визначається так:

$$S_{p1} = \frac{P_{пит1} \cdot N + 0,9P_{сил}}{\cos \varphi} \quad (13)$$

Попередньо вибираються трансформатори 2×ТМ-250/10 та 2×ТМ-160/10. Початковий коефіцієнт навантаження трансформаторів 2×ТМ-250/10

$$K_{н1} = \frac{1}{2S_{т1}} \sqrt{\frac{\int_0^{20,41} S_{p1}^2(t) dt + \int_{23,11}^{24,0} S_{p1}^2(t) dt}{21,3}} \quad (14)$$

Перевантаження  $K_{н2}$  за його тривалості  $t_{н.п}$  знаходиться аналогічно.

Отримане за нормативами навантаження 582,3 кВА силових трансформаторів 2×ТМ-250/10 не задовольняє вимогам задачі, тому остаточно вибираються для ТП трансформатори 2×ТМ-400/10.

Аналогічно, за електричним навантаженням 361,5 кВА визначено графічно, остаточно вибираються для ТП трансформатори 2×ТМ-250/10.

Таким чином, варіант з трансформаторами 2×ТМ-250/10, що вибрано за графічного обчислення навантаження 4-х будинків, заощадить (*енергетична ефективність*) за час експлуатації біля 492,2 т у. п., за витратою електроенергії (*економічна ефективність*) варіант дешевший на 268,2 тис. грн, при цьому зменшаться викиди (*екологічна ефективність*) у навколишнє середовище близько 163,6 т.

Розглядається застосування макромоделювання як основи прогнозування за дискретними автономними макромоделями електроспоживання об'єкта.

Процедура побудови макромоделі проводиться у такій послідовності:

- вибір набору вхідних і вихідних даних й форми шуканої моделі, записаної через коефіцієнти, яка б достатньо точно описувала об'єкт моделювання;
- створення лінійної макромоделі шляхом оптимізації її коефіцієнтів та доповнення її нелінійною функцією оптимізаційного вигляду;
- проведення остаточної оптимізації макромоделі, де процедурі оптимізації підлягають усі коефіцієнти;
- перевірка отриманої нелінійної макромоделі на незалежному наборі тестових експериментальних даних.

Для побудови дискретної автономної макромоделі електроспоживання 216-квартирного будинку використано дані щодобового електричного навантаження за 2 тижні жовтня місяця 2017 року (рис. 9).

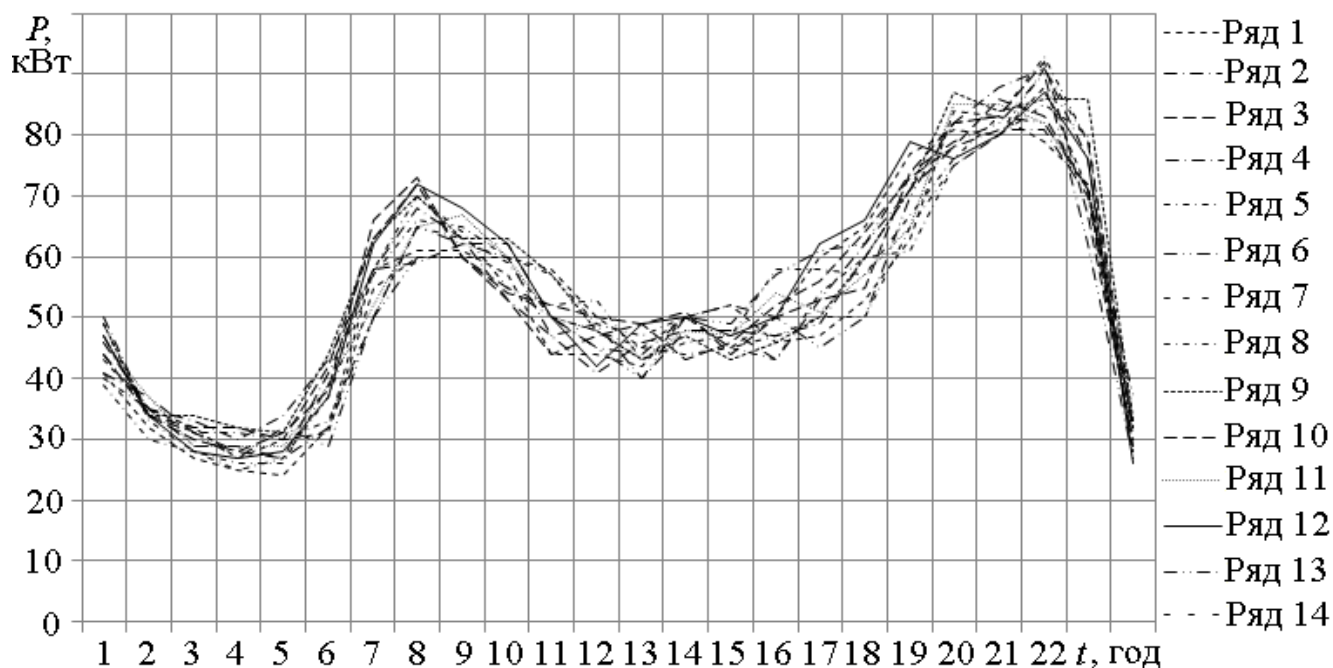


Рисунок 9 – Графіки добового електричного навантаження 216-квартирного будинку (день за порядком у жовтні 2017 р. співпадає з номером ряду)

Дискретну макромоделювання електроспоживання будинку представлено так:

$$\begin{cases} \bar{x}^{(i+1)} = \mathbf{F} \bar{x}^{(i)} \\ \bar{y}^{(i+1)} = \mathbf{C} \bar{x}^{(i+1)} \end{cases} \quad (15)$$

Початкове значення змінних стану визначалося на основі лінійної залежності від рівня споживання електроенергії будинком у довільно вибраному часі, а саме о 8, 13 та 22-й годині:

$$\bar{x}^{(0)} = \mathbf{S} \begin{pmatrix} y_8 \\ y_{13} \\ y_{22} \end{pmatrix}. \quad (16)$$

Коефіцієнти матриць **F**, **C**, **S** макромоделі у стрічковому вигляді такі:

– матриця **F**: [1.0871, -0.3336, 0.3777, -0.4018, 1.0648, 0.3031, -0.0340, -0.1624, 0.1795, 0.9370, 0.3278, 0,3991, 0.2344, 0.7090, 1.0619];

– матриця **C**: [-0.6564, 0.3965, 0.0359, 0.4721];

– матриця **S**: [-0.1302, 0.2074, -0.6485, 0.3443, 0.0820, 0,0833, 0.5044, 0.2064, -0.3413, -0.0997, -0.3074, -0.06894].

Графічне представлення динаміки річного електроспоживання будинку, яка відтворена макромоделлю, що позначена суцільною лінією (—), за апріорної інформації, що позначена штрих-пунктирною лінією (— — —) за період з 01.10.2017 по 30.09.2018 р., наведено на рис. 10.

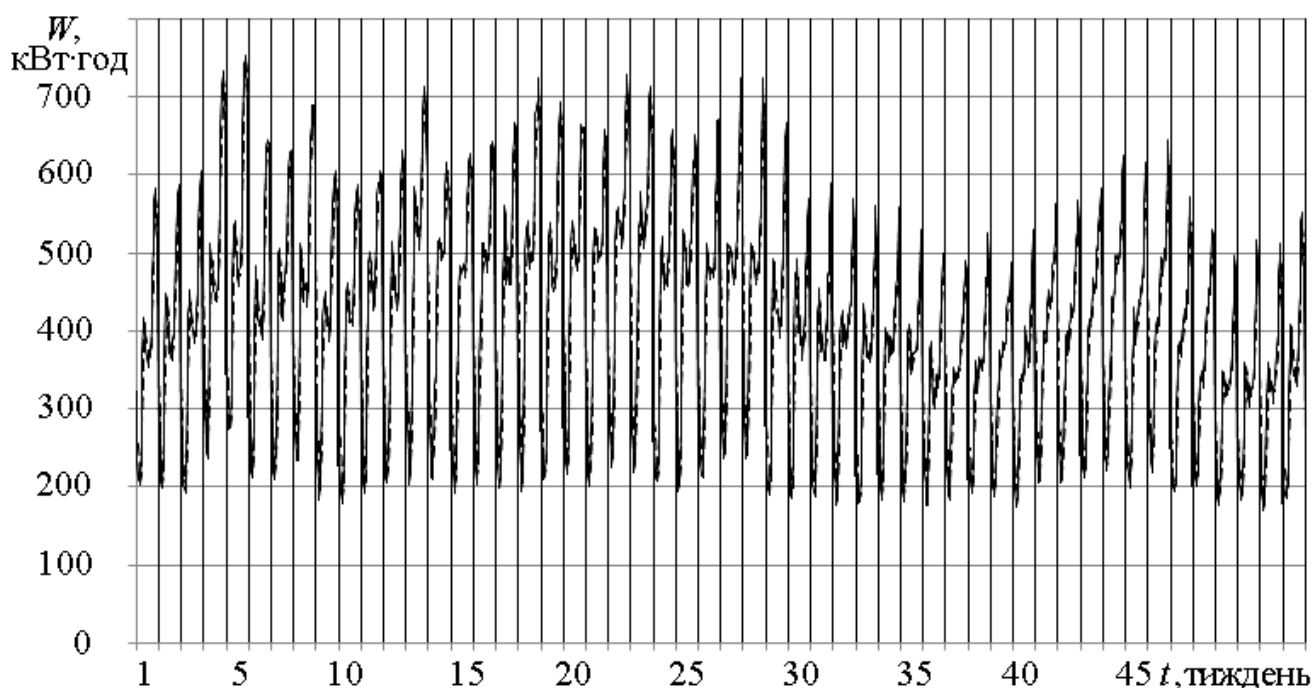


Рисунок 10 – Реакція макромоделі (—) на вхідні дані (— — —) електроспоживання 216-квартирного будинку за період з 01.10.2017 по 30.09.2018 р.

Апробація математичної макромоделі електроспоживання 216-квартирного будинку на основі дискретного макромодельовання продемонструвала здатність моделі надавати адекватну інформацію за середньоквадратичної похибки 3,1 %.

Аналіз отриманої макромоделі дозволяє оцінити як місячну, так і сезонну динаміку електроспоживання протягом року та уникнути кризових періодів шляхом узгодження сумісних управлінських дій суб'єктів енергоринку, направлених на мінімізацію негативного їх впливу на якість електропостачання.

*Фрактальний R/S-аналіз*, тобто відслідковування відношення розмаху  $R$  до стандартного відхилення  $S$ , є базовим інструментом для дослідження часових рядів з метою придатності його до прогнозування. За допомогою запропонованого Херстом  $R/S$ -аналізу вдається виявити і чисельно оцінити такі фундаментальні характеристики часових рядів, як наявність довготривалої пам'яті та її глибину, персистентність тощо. Використання цих критеріїв дозволяє будувати прогнозні моделі, які виявляються продуктивними у разі, коли класичні методи прогнозування виявляються неефективними.

У роботі за допомогою  $R/S$ -аналізу доведено наявність фрактального принципу формування навантаження саме цивільних об'єктів, на прикладі житлових будинків мікрорайону, оскільки в науковій літературі, в основному, приділено увагу з цього питання енергосистемам, промисловим підприємствам.

З метою дослідження фрактальної структури електричного навантаження цивільних об'єктів, розглядається аналогія між побудовою Кривої Коха та принципом формування електроспоживання на прикладі багатоповерхових житлових будинків мікрорайону міста. Як відомо, для отримання Кривої Коха необхідно розділити відрізок на три рівні частини, на середній з яких побудувати правильний трикутник. Кожну із сторін фігури, що утворилася, знову розділити на три рівні частини і на середніх із них побудувати правильні трикутники і т. д.

Результатом цього процесу буде Крива Коха, побудова якої за п'ять ітерацій наведено на рис. 11.

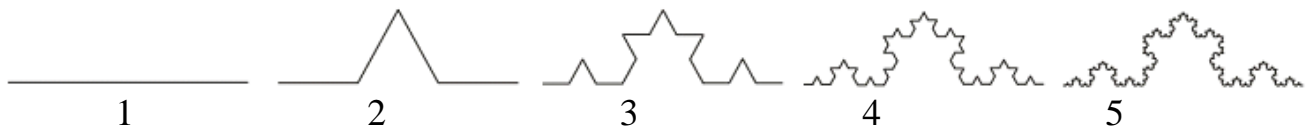


Рисунок 11 – Стадії побудови Кривої Коха

Оскільки фрактал – це геометрична форма, яка може бути розділена на частини, кожна з яких – зменшена версія цілого, то таку особливість можна застосувати до формування графіків навантаження житлових будинків. При цьому добове електроспоживання будинку складатиметься із щодобового електроспоживання кожної з 216-ти квартир, наприклад, за середу, 4 жовтня 2017 р. (рис. 12).

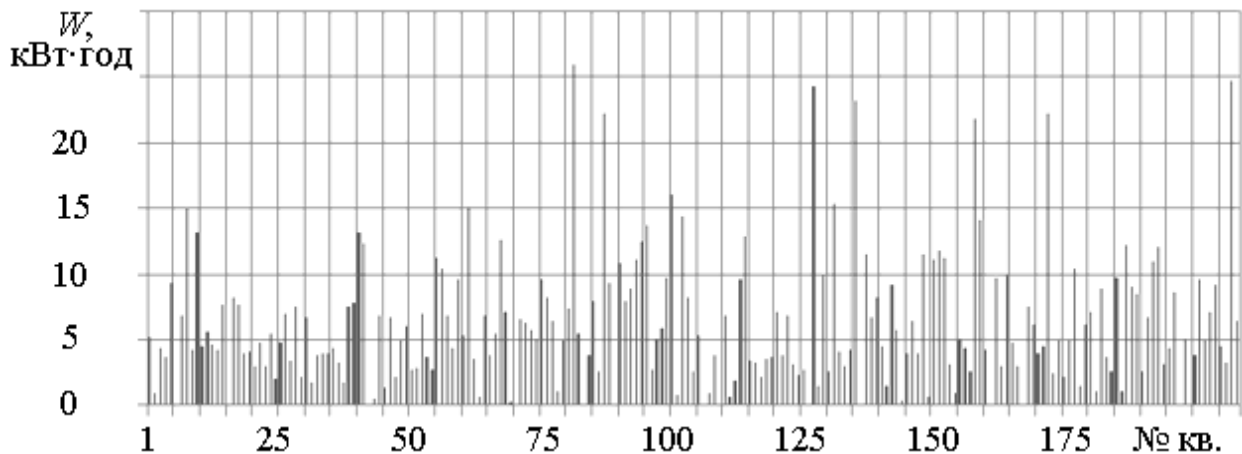


Рисунок 12 – Динаміка добового електроспоживання кожної з 216 квартир

Добові графіки електроспоживання формують тижневий графік (рис. 13).

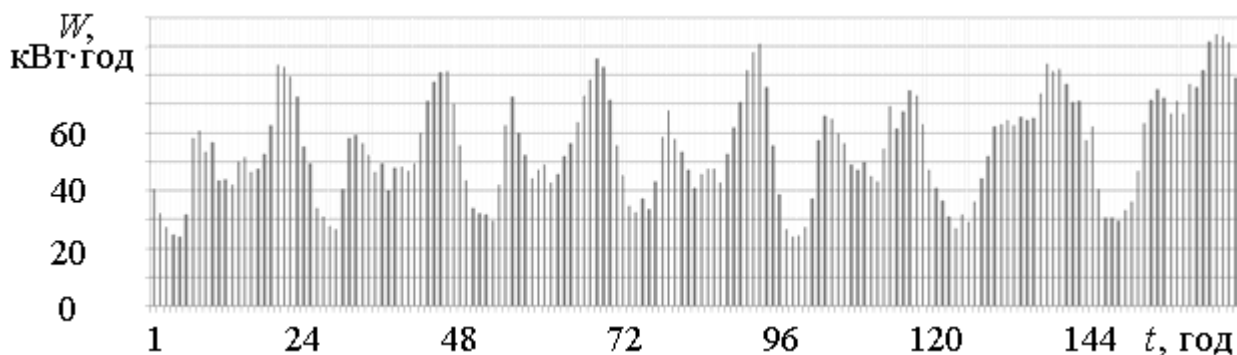


Рисунок 13 – Динаміка тижневого електроспоживання житлового будинку

Тижневі криві формують місячний графік електроспоживання (рис. 14).

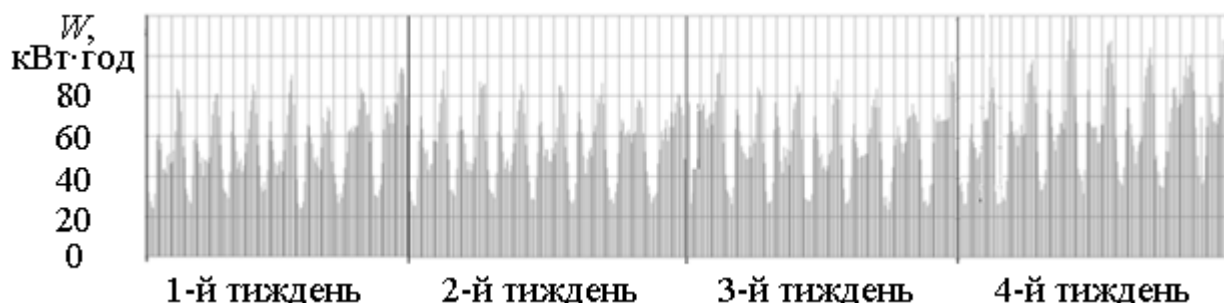


Рисунок 14 – Динаміка електроспоживання будинку за 4 тижні жовтня 2017 р.

Необхідна для фрактального аналізу ряду  $R/S$ -траєкторія представляється в декартових логарифмічних координатах послідовністю точок, абсциси яких  $x_\tau = \log(\tau/2)$ , а ординати  $y_m = \log[R(\tau)/S(\tau)]$  (рис. 15).

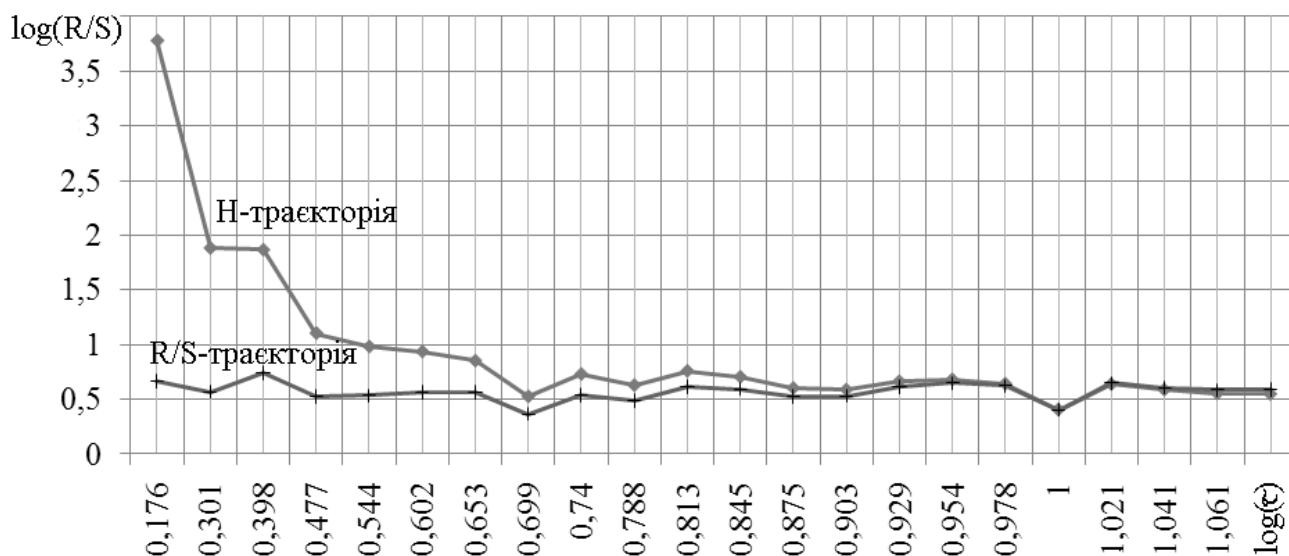


Рисунок 15 –  $R/S$ -траєкторія і  $H$ -траєкторія відрізка часового ряду за 4 жовтня 2017 р. електроспоживання житлового будинку

Значення  $H$  в межах  $\sim 0,5 \pm 0,1$  є зоною «білого шуму», який відповідає «хаотичній поведінці часового ряду» і, відповідно, найменшій надійності прогнозу електричних навантажень. Значення  $H$  в межах  $0,3 \pm 0,1$  визначають зону «рожевого шуму», що означає характерну антиперсистентність, яка властива цьому відрізьку часового ряду.

Таким чином, динаміка електроспоживання житлового будинку відповідає персистентному часовому ряду, оскільки  $0,5 < H < 1,0$ , тобто має всі ознаки фракталу, і може бути описаний як узагальнений броунівський рух, для якого характерна наявність кореляції між подіями за часовою шкалою.

Показник Херста  $H$  описує таку ймовірність динаміки часового ряду, при якій дві послідовні події можуть бути однаковими. За значенням  $H > 0,6$  існує ймовірність того, що: якщо попередній рух був додатнім, то він і залишиться таким ще деякий час.

З метою виявлення властивості фрактальності у графіках електричних навантажень, досліджено довготривалий ряд щодобового електроспоживання 216-квартирного будинку за період з 02.10.2017 р. по 08.04.2018 р., який містить 1680 спостережень (рис. 16).

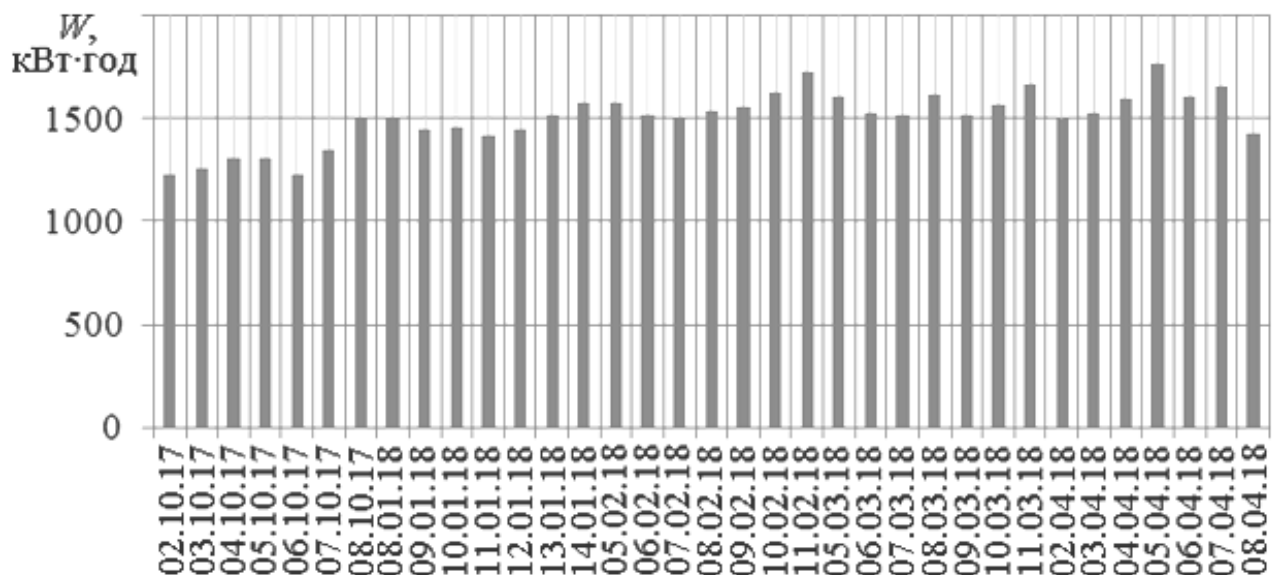


Рисунок 16 – Динаміка вибіркового щодобового електроспоживання 216-квартирного будинку з 02.10.2017 р. по 08.04.2018 р.

Поведінка у часі з 02.10.2017 р. по 08.04.2018 р.  $R/S$ -траєкторії, що наведена на рис. 17, свідчить про хаотичну поведінку часового ряду (відповідає «білому шуму»), якому властива часта зміна тренда електроспоживання багатопверхового житлового будинку.

Показано, що для вивчення таких процесів, як споживання електроенергії об'єктами цивільного призначення, може бути використаний базовий інструмент фрактального аналізу часових рядів  $R/S$ -аналіз, який дозволяє виявити і чисельно оцінити фундаментальні характеристики та кризові періоди часових рядів, за яких можливі аварійні ситуації.

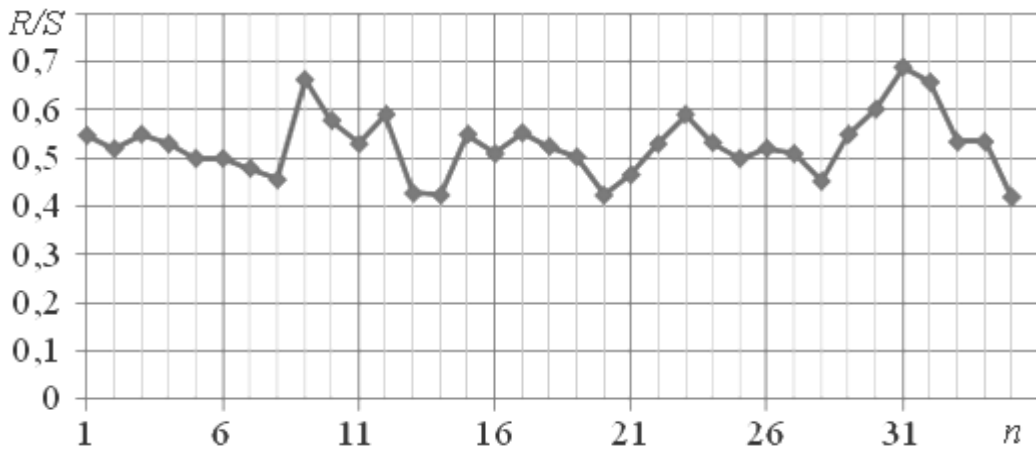


Рисунок 17 – Результат R/S-аналізу вибіркового електроспоживання багатоквартирного будинку з 02.10.2017 р. по 08.04.2018 р.

За результатами дослідження визначено придатність R/S-аналізу для довготривалого прогнозування електроспоживання цивільних об'єктів.

Дисперсійний аналіз динаміки електроспоживання є одним із методів обробки й аналізу даних з точки зору впливу одного або декількох факторів на ознаку, що спостерігається.

Річна, сезонна, місячна, добова динаміка та періодичність електроспоживання визначається такими метеорологічними і зовнішніми факторами, як сезонне коливання температури повітря на території розташування об'єктів, зміна тривалості світлого часу доби та ін. (рис. 18).

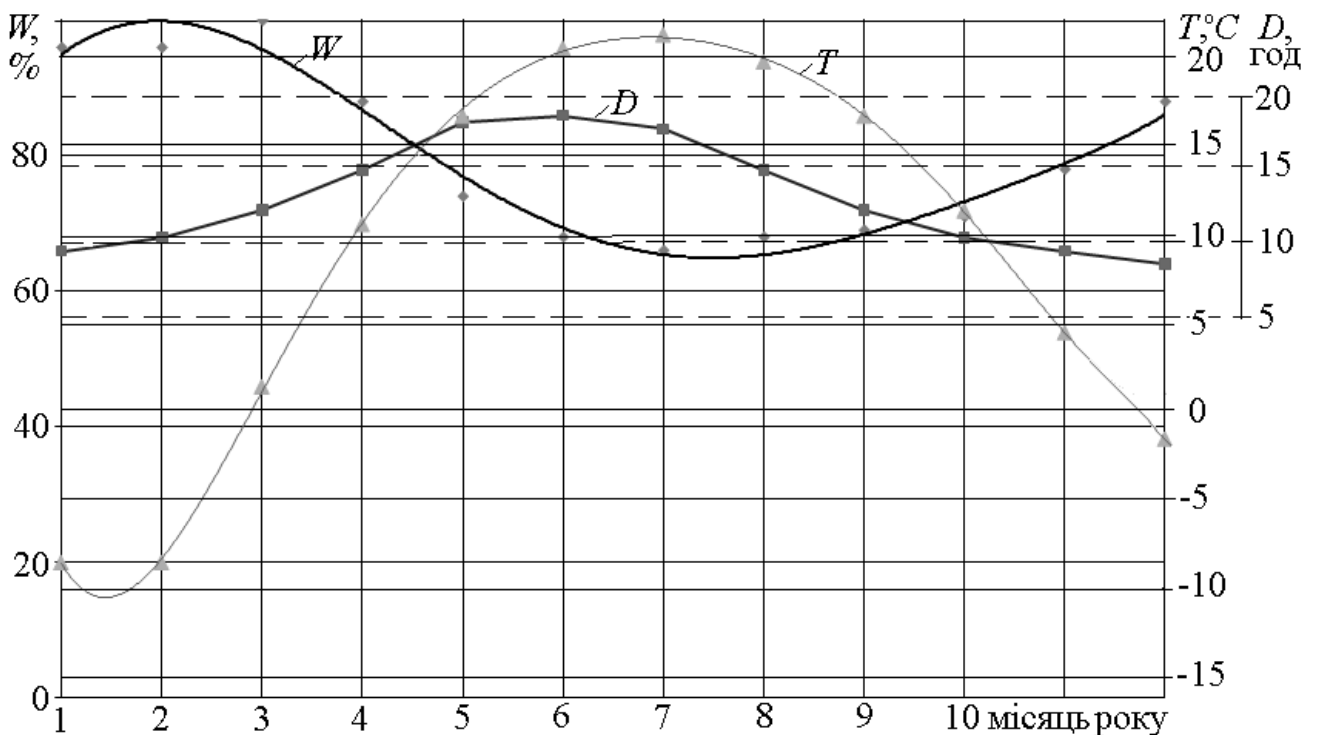


Рисунок 18 – Результат моделювання:  $W$  – щомісячного електроспоживання міста;  $T$  – середньомісячної температури;  $D$  – тривалості світлого часу доби

Нехай головним фактором є температура повітря  $T_{\text{сер}}$ , а додатковим – тривалість світлого часу доби  $D$ , припускаючи, що фактор  $T_{\text{сер}}$  приймає  $K$ , а фактор  $D$  –  $m$  різних значень (табл. 5).

Таблиця 5

Матриця спостережень двофакторного дисперсійного аналізу

Температура / Тривалість дня	$T_{\text{сер}.1}$	$T_{\text{сер}.2}$	...	$T_{\text{сер}.k}$
$D_1$	$W_{11}$	$W_{12}$	...	$W_{1k}$
$D_2$	$W_{21}$	$W_{22}$	...	$W_{2k}$
...	...	...	...	...
$D_m$	$W_{m1}$	$W_{m2}$	...	$W_{mk}$

За результатами дисперсійного аналізу впливу природних чинників на динаміку електроспоживання міста визначено, що для фактора  $T_{\text{сер}}$  розрахункове значення величини критерію Фішера  $F_p^{T_{\text{сер}}} = 9,394$ , а критична область утворюється правостороннім інтервалом  $(4,0201; +\infty)$ . Так як  $F_p^{T_{\text{сер}}} = 9,394$  потрапляє в критичну область, то вважається, що температура вплинула на величину електроспоживання.

Для фактора  $D$  розрахункове значення величини критерію Фішера  $F_p^D = 2,291$ , а критична область утворюється правостороннім інтервалом  $(1,6012; +\infty)$ . Так як  $F_p^D = 2,291$  потрапляє в критичну область, то вважається, що фактор тривалості світлого часу доби вплинув на величину електроспоживання.

**Розділ 5** містить метод обчислення впливу струму вищих гармонік на електричне навантаження електричних мереж, що ґрунтується на моделюванні режиму роботи ЕП житла, які наведено в табл. 1. Серед ЕП суттєве спотворення синусоїдності за струмом викликає кондиціонер, амплітудний спектр гармонік струму якого, при фоновому коефіцієнті спотворення за напругою THD% до 3%, наведено на рис. 19.

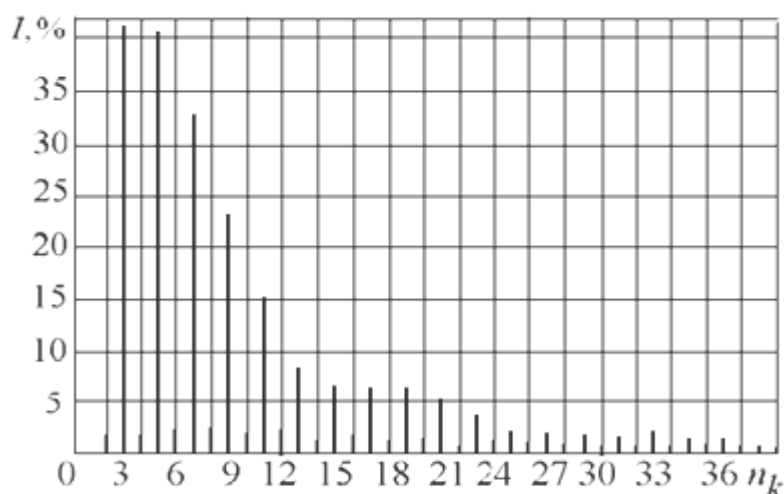


Рисунок 19 – Амплітудний спектр гармонік струму побутового кондиціонера SENSEI ECO FTE-23MR



Моделювання спектру струмів у групових мережах квартири може служити основою для визначення додаткового навантаження (нагрівання) електропроводки від виникнення вищих гармонік, порівняно з першою (50 Гц), що генеруються ЕП з нелінійними характеристиками (рис. 20).

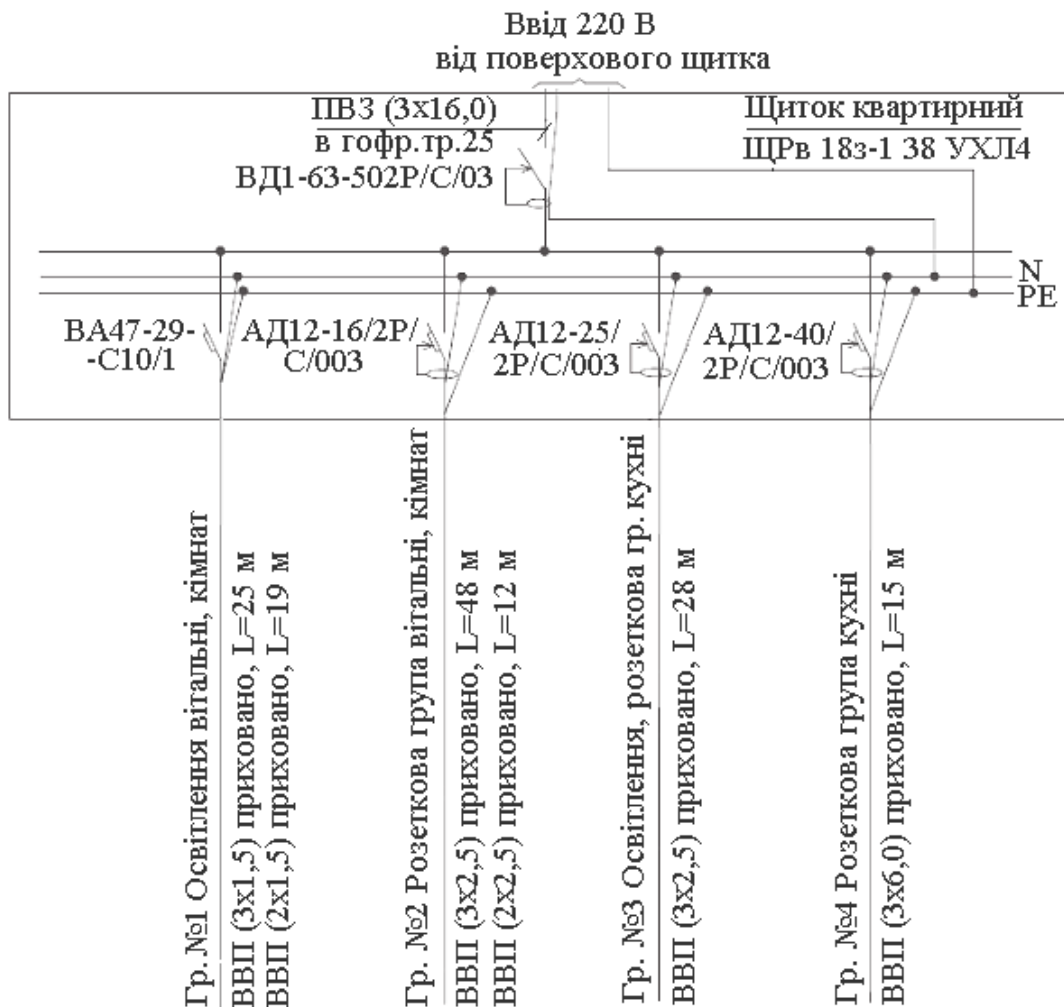


Рисунок 20 – Схема квартирних групових електричних мереж напругою 220 В

Граф схеми групових електричних мереж напругою 220 В житла наведено на рис. 21.

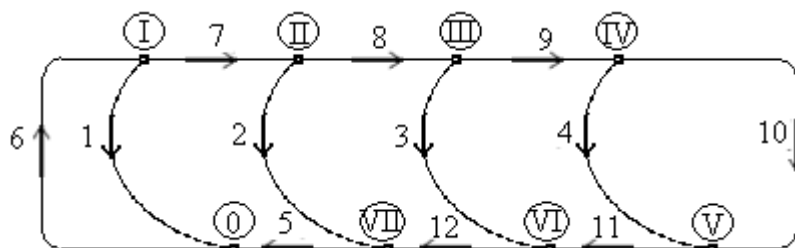


Рисунок 21 – Граф схеми електричної мережі житла

Математичні моделі диференційних рівнянь, які описують процеси, що відбуваються в електричній мережі квартири за дією від 1 до 40-ї гармоніки, мають такий вигляд:

$$\left. \begin{aligned} e_{11} - R_{11}i_{11} - L_{11} \frac{di_{11}}{dt} &= u_{11} \\ R_{12}i_{12} - L_{12} \frac{di_{12}}{dt} &= u_{12} \\ &\dots \\ e_{1n} - R_{1n}i_{1n} - L_{1n} \frac{di_{1n}}{dt} &= u_{1n} \\ &\dots \\ e_{40.1} - R_{40.1}i_{40.1} - L_{40.1} \frac{di_{40.1}}{dt} &= u_{40.1} \\ R_{40.2}i_{40.2} - L_{40.2} \frac{di_{40.2}}{dt} &= u_{40.2} \\ &\dots \\ e_{40n} - R_{40n}i_{40n} - L_{40n} \frac{di_{40n}}{dt} &= u_{40n} \end{aligned} \right\}, \quad (17)$$

де  $R$  – активний опір,  $L$  – індуктивність ділянок електричної мережі, що позначені відповідними індексами;  $e$ ,  $i$ ,  $u$  – е. р. с., струм і напруга гармонік і ділянок, що позначені відповідними індексами.

Загальне рівняння теплового балансу ділянок електропроводки з урахуванням дії струму вищих гармонік та перетоку тепла у навколишнє середовище від провідників шляхом теплопровідності має вигляд:

$$i_n^2 R = m C d\theta + \alpha(\theta - \theta_c) F dt, \quad (18)$$

де  $m$ ,  $C$  – маса, теплоємність провідника;  $\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $\theta$ ,  $\theta_c$  – температура провідника і середовища відповідно;  $F$  – площа поверхні провідника.

Шляхом перетворень рівнянь процеси, що відбуватимуться в електричній мережі у векторній формі мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \vec{e}_n - \rho \mathbf{I} \vec{j}_n - \mathbf{L}_n \mathbf{S} \frac{d\vec{j}}{dt} &= \vec{u}_n \\ \frac{d\vec{\theta}}{dt} + \frac{2\alpha}{\gamma Cr} \vec{\theta} &= \frac{\rho}{\gamma C} \vec{j}^2 + \frac{2\alpha}{\gamma Cr} \vec{\theta}_c \end{aligned} \right\}, \quad (19)$$

де  $\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{S}$  – діагональні матриці довжини ділянок, індуктивностей, перерізів провідників за радіусом  $r$ ;  $j$  – густина струму.

На рис. 22 наведено осцилограму RMS-струму 1-ї гармоніки (а) та HRMS-струму вищих гармонік (б) вечірнього електричного навантаження ЕП на ввіді квартири з газовою плитою протягом 3 год 45 хв. 15.03.2017 р. (табл. 1, 2).

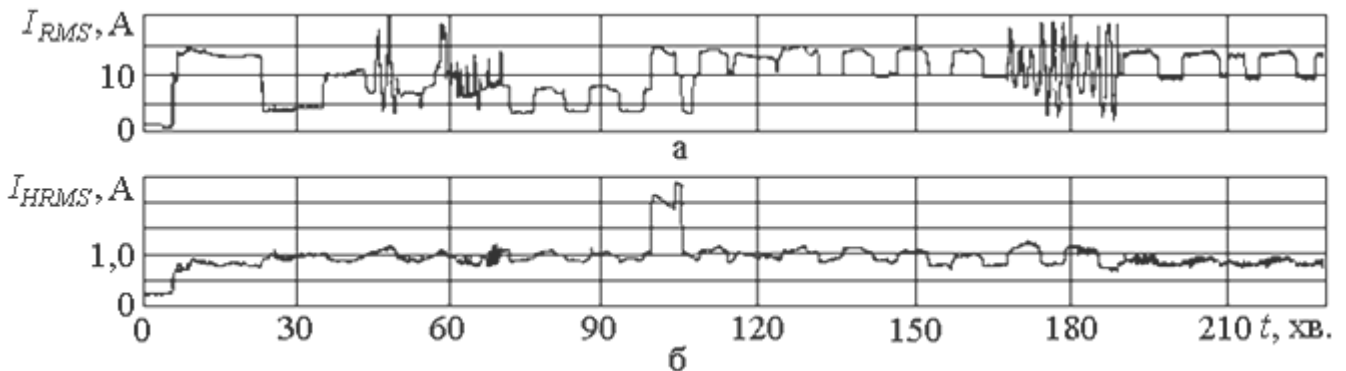


Рисунок 22 – Осцилограми RMS-струму (а) та HRMS-струму (б) на ввіді житла

За результатами вимірювань осцилограми HRMS-струмів за фазами А, В, С і нейтралі N електричного навантаження кабелю на ввіді 144-квартирного будинку наведено на рис. 23.

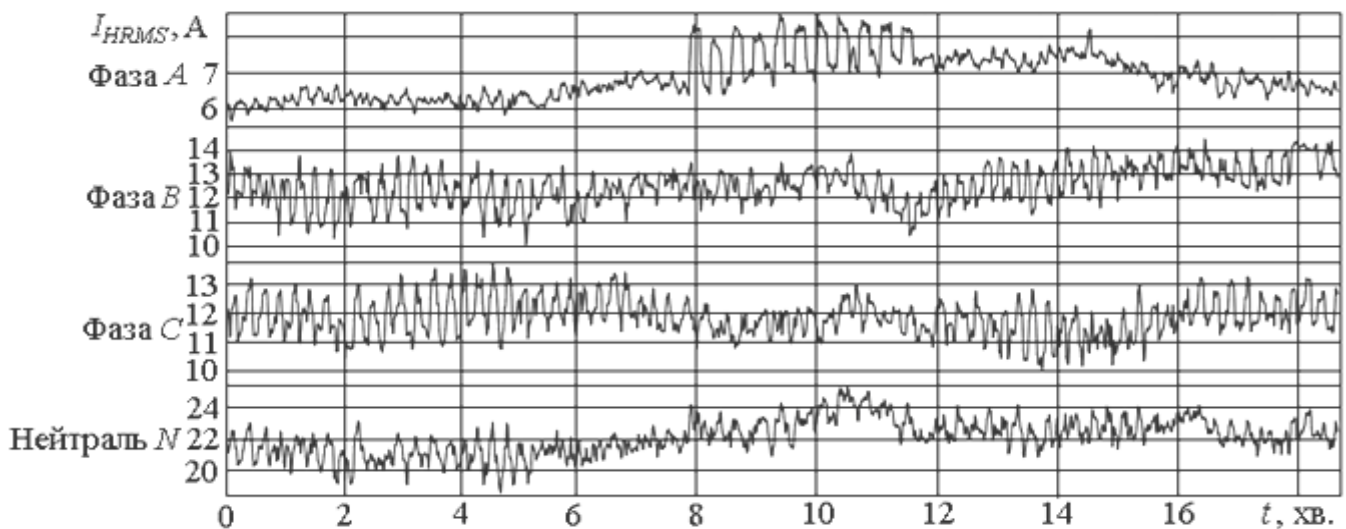


Рисунок 23 – Осцилограми HRMS-струмів за фазами А, В, С і нейтралі N навантаження кабелю на ввіді 144-квартирного будинку за среду 15.03.2017 р.

Значення RMS-струму 1-ї гармоніки за фазами А, В, С та нейтралі N живильного кабелю становлять 104,5, 124,8, 106,1, 65,6 А відповідно.

Кабель ААШв-1(3×95+1×35) напругою 0,4 кВ від ТП-10/0,4 кВ до ВРП 144-квартирного будинку має довжину близько 60 м і в будинку по підвалу і стоякам прокладено – кабель ААШв-1(3×35+1×16) довжиною 250 м.

Збільшення витрат активної потужності, за рахунок генерації ЕП з нелінійними характеристиками вищих гармонік у кабелі становить 7,65% відносно витрат за основної частоти, при фоновому коефіцієнті спотворення напруги за фазами А, В, С близько 4,6, 6,1, 4,3% відповідно.

**Розділ 6** присвячено методу визначення впливу вищих гармонік мережевої сонячної електростанції (МСЕС), через наявність мережевого інвертора та ЕП з нелінійною характеристикою, на величину навантаження електричних мереж.

*Експериментальна база дослідження* ґрунтується на устаткуванні мережевої сонячної електростанції потужністю 30 кВт, яка розташована на даху будинку з орієнтацією на південь з координатами  $46^{\circ} 29' 08''$  північної широти,  $30^{\circ} 44' 36''$  східної довготи відповідно.

Елементи МСЕС та схема проведення дослідження наведено на рис. 24.



Рисунок 24 – Основні елементи мережевої сонячної електростанції потужністю 30 кВт та схеми проведення дослідження

*Сонячна панель* TALESAN TP660P-260W полікристалева (виробництво Китаю), потужність 260 Вт, напруга х. х. 37,8 В, номінальний струм 8,51 А, струм короткого замикання 9,16 А, номінальна робоча температура від  $-45^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

*Мережевий інвертор* HUAWEI SUN2000-36KTL (виробництво Китаю) потужністю 36 кВт, коефіцієнт корисної дії не менше 98,6%, робоча температура від  $-25^{\circ}\text{C}$  до  $+60^{\circ}\text{C}$ .

Дослідження виконувалося за допомогою аналізатора якості електричної енергії Elspec G4500 BLACKBOX Portable компанії Elspec Technologies.

Результати вимірювання коефіцієнтів спотворень напруги для мережевого інвертора показав, що їх значення допустимі (рис. 25).

Однак, при підключенні нелінійних ЕП до виходу інвертора, відбуватиметься подальше спотворення напруги та струму, яке викликати додаткове навантаження в електричній мережі й у разі перевищення його більш, ніж на 25% навантаження об'єкта, може настати перегрівання живильного кабелю через збільшення струму в нейтралі.

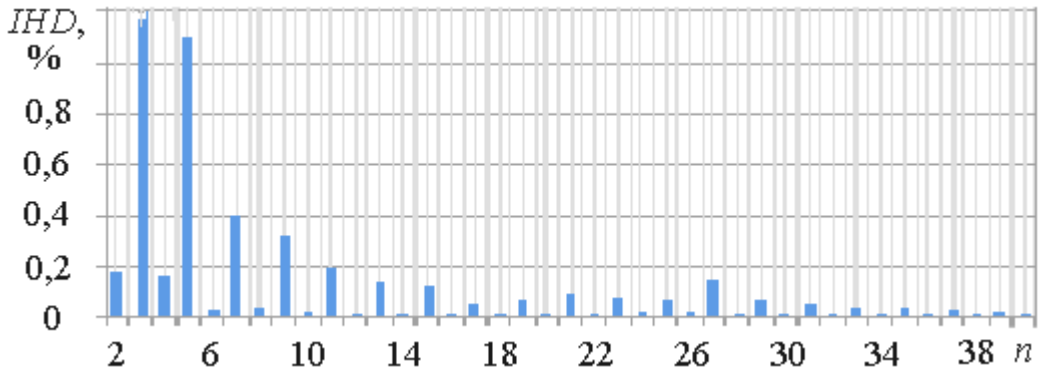


Рисунок 25 – Результат вимірювання гармонійного спектру напруги на виході мережевого інвертора

За результатами попередніх розрахунків, за сплайн-інтерполяцією значень електричного навантаження в електропроводці від електричного щитка до побутового кондиціонера та вимірювань аналізатором якості електричної енергії, витрати потужності збільшилися на 7,6% відносно витрат за основної частоти, що потрібно враховувати при аналогічних розрахунках.

Диференціювання за зонами доби тарифів на електроенергію є одним із ефективних заходів щодо зрівнювання добових графіків навантаження та зменшення розрахункового електричного навантаження. Наприклад, за побудованими графіками за сплайн-інтерполяцією інформації АСКОЕ добового електричного навантаження 144-квартирного будинку до і після умовного перенесення роботи окремих ЕП на нічні години з 23 до 7-ої ранку, визначена ефективність запровадження двозонного тарифу на електроенергію для населення (рис. 26).

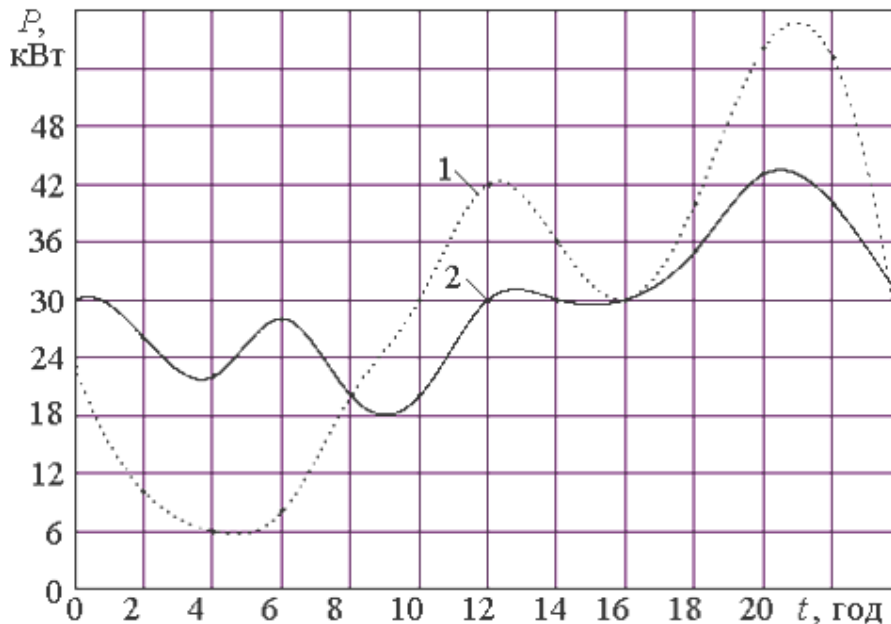


Рисунок 26 – Графіки навантаження 144-квартирного будинку: 1 – до перенесення роботи ЕП на нічні години; 2 – після умовного перенесення роботи окремих ЕП на нічні години

Роботу таких ЕП як бойлера, посудомийної та пральної машин, електричного опалення, насосу закачування води у ємкості, можна перенести на нічні години.

За графічним обчисленням варіантів сплати за спожиту електроенергію мешканцями 144-квартирного будинку, найдешевшим є варіант розрахунку за двозонним тарифом, за яким вартість електроенергії на 50 % менший від «основного» тарифу. Це на 15,9% дешевше від розрахунків за одноставковим тарифом, при цьому навантаження по житловому будинку зменшиться на 25,9%, відносно електричного навантаження до перенесення роботи ЕП на нічні години.

*Зменшення спотворень синусоїдності струму* в мережі здійснюється шляхом застосування активних, пасивних *LC*-фільтрів, що налаштовані на певний порядок гармонік. Вони запобігають проникненню гармонік через мережі до чутливих ЕП (рис. 27).

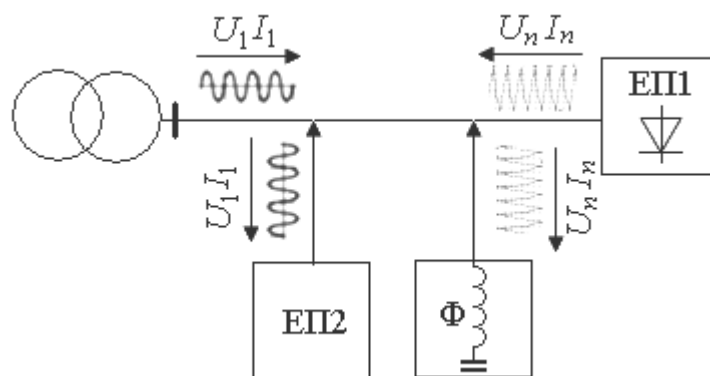


Рисунок 27 – Схема з використанням пасивного фільтра ( $\Phi$ ) вищих гармонік, що приєднується між споживачем ЕП1 з нелінійною і ЕП2 з лінійною характеристикою

Розділові трансформатори зі з'єднанням обмоток  $\Delta/Y$  з нулем, перешкоджають проникненню 3-х гармонік у вторинну обмотку, до якої приєднуються ЕП, що чутливі до вищих гармонік. Також застосовують увімкнення магнітних синтезаторів для захисту від спотворень, резонансних шунтів, активних фільтрів, що генерують гармоніки протилежних за знаком, який часто використовують як доповнення до пасивних фільтрів.

**Розділ 7** розкриває графічний метод прогнозування ефективності застосування гібридних сонячних колекторів для енергопостачання багатоквартирних будинків. Дослідження здійснювалося на прикладі енергоспоживання 144-квартирного будинку, який складається з 4-х під'їздів, що містять по 36 квартир з газовими плитами. Динаміка добового електричного навантаження і гарячого водопостачання будинку наведені на рис. 28.

Сонячний гібридний колектор типу *ATMOSFERA-F2PV* – єдина конструкція, що складається з фотоелектричного модуля потужністю 300 Вт і геліоколектора тепловою потужністю 1037 Вт. Електроенергія від фотоелектричного модуля колектора через мережевий інвертор спрямовується по кабельній лінії напругою 0,4 кВ до ввідно-розподільного пункту (ВРП) будинку.

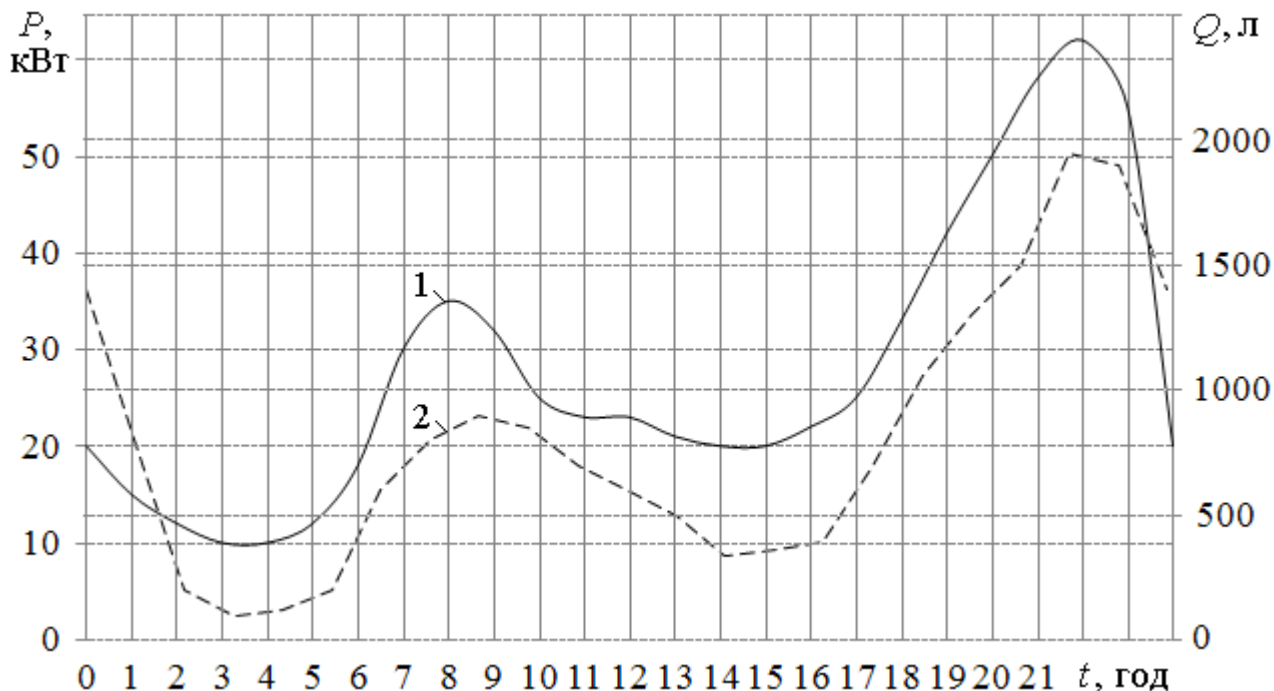


Рисунок 28 – Добовий графік: 1 – електричного навантаження; 2 – гарячого водопостачання 144-квартирного будинку

Теплова енергія від гібридного колектора спрямовується до теплопункту будинку для потреб гарячого водопостачання та підтримування системи доопалення приміщень у холодний період року.

Для енергопостачання будинку вибрано 200 панелей гібридного колектора, динаміка генерації енергії якого протягом року наведена на рис. 29.

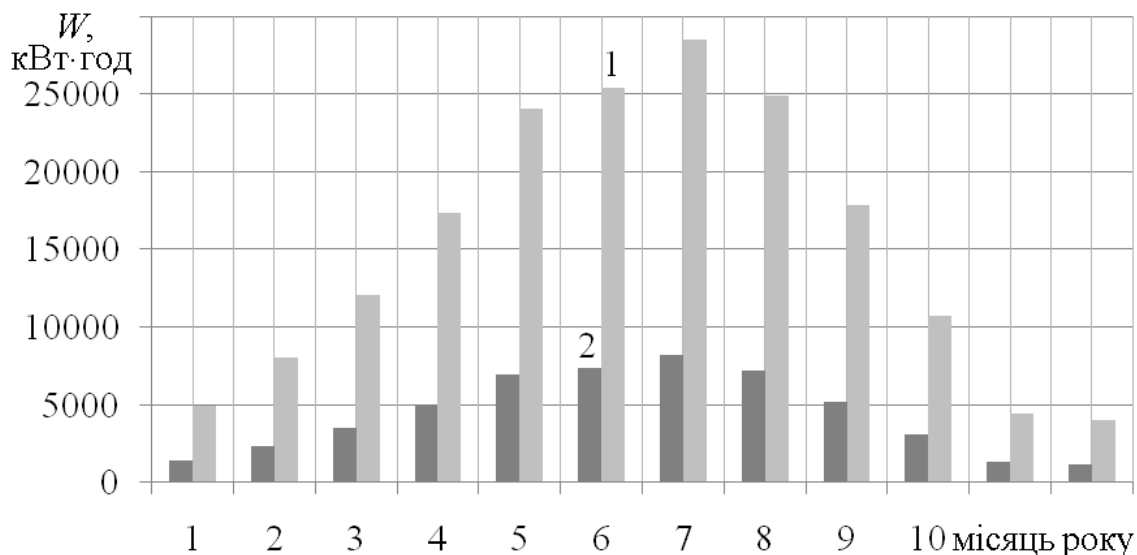


Рисунок 29 – Динаміка генерації енергії гібридним сонячним колектором протягом року: 1 – теплової та 2 – електричної енергії

За даними з 2010 р. і екстраполяцією трендів до 2045 р. визначено ймовірнісну динаміку тарифів на електроенергію (рис. 30).

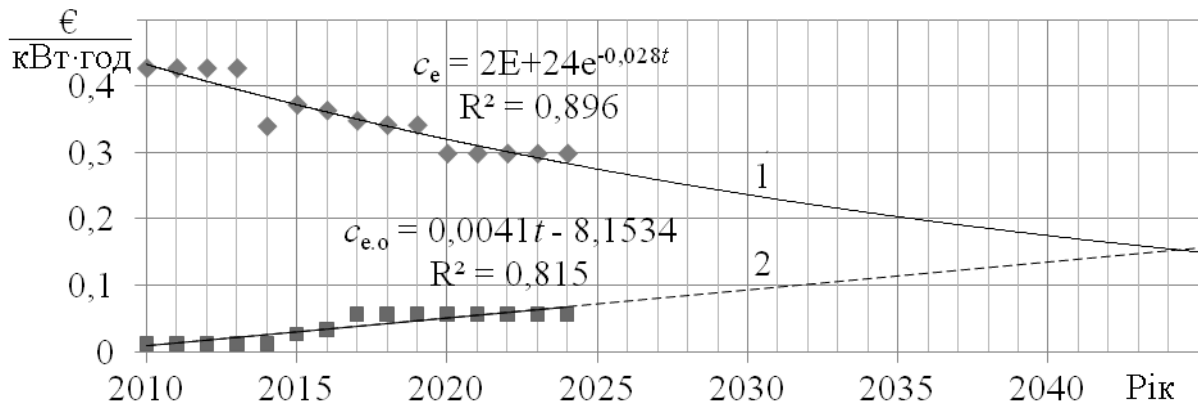


Рисунок 30 – Динаміка тарифів: 1 – «зеленого» на сонячну електроенергію; 2 – «основного» на електроенергію

Екстраполяцією трендів за лінійною функцією з 2029 до 2045 р., визначено ймовірнісну динаміку тарифів на гаряче водопостачання (рис. 31).

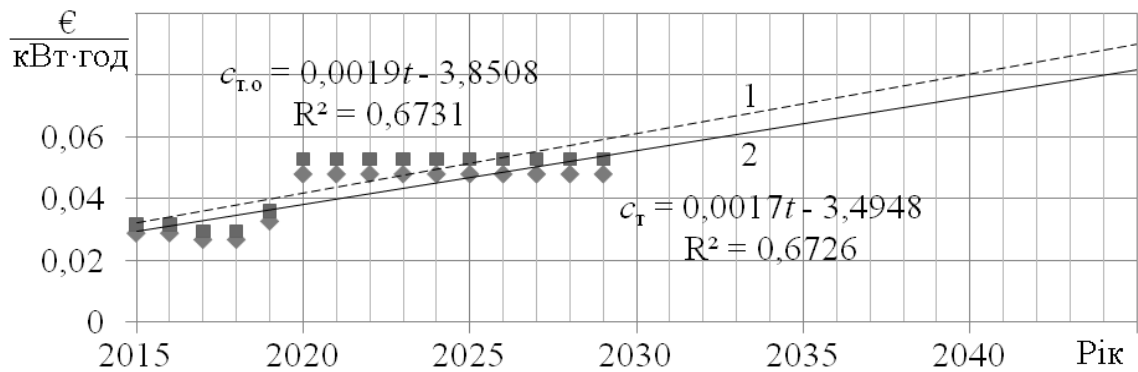


Рисунок 31 – Імовірнісна динаміка тарифів: 1 – «основного» на гаряче водопостачання; 2 – «зеленого» на сонячне гаряче водопостачання

Імовірнісна динаміка вартості гібридного сонячного колектора на період до 2045 року наведена на рис. 32.

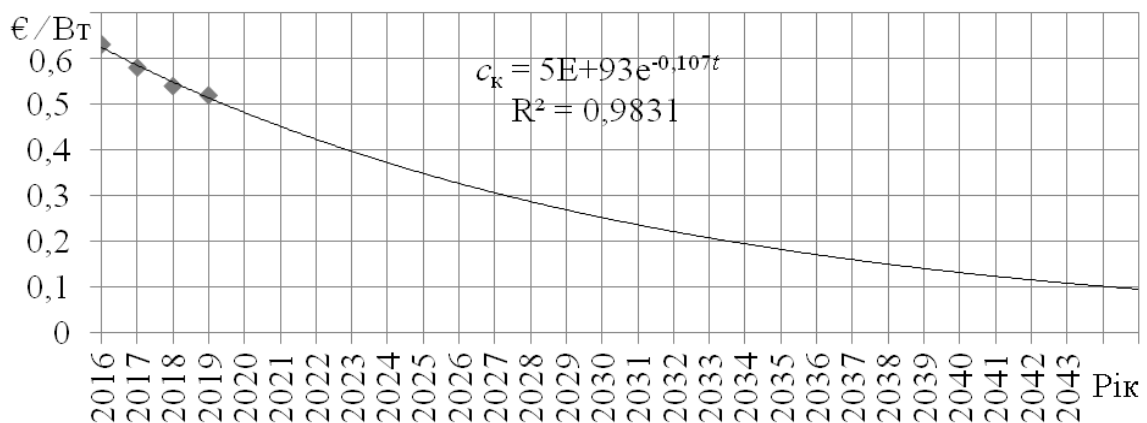


Рисунок 32 – Імовірнісна динаміка вартості гібридного сонячного колектора



Ефективність інвестиційного проєкту визначається за чистою поточною вартістю  $NPV$  його упровадження. Вона отримуватиметься шляхом дисконтування, тобто приведення грошових надходжень за майбутні періоди до їх теперішньої вартості. У разі позитивного значення  $NPV$  за строк експлуатації колектора, проєкт вважається доцільним до запровадження, в іншому випадку – він збитковий (рис. 33).

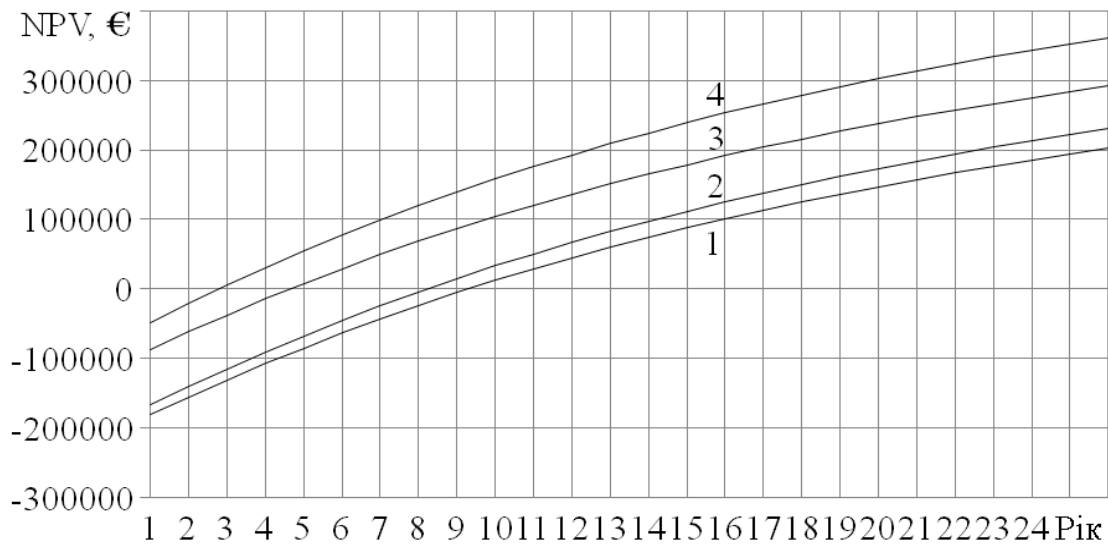


Рисунок 33 – Результат розрахунку  $NPV$  проєкту за «зеленим тарифом» на енергію, введеного в експлуатацію у: 1 – 2019 р.; 2 – 2020 р.; 3 – 2030 р.; 4 – 2040 р.

Результат розрахунку вкладень і прибутку за «зеленим» та «основним» тарифами на енергію для мешканців квартир за період експлуатації гібридного сонячного колектора введеного у дію за відповідний рік, наведено на рис. 34, 35.

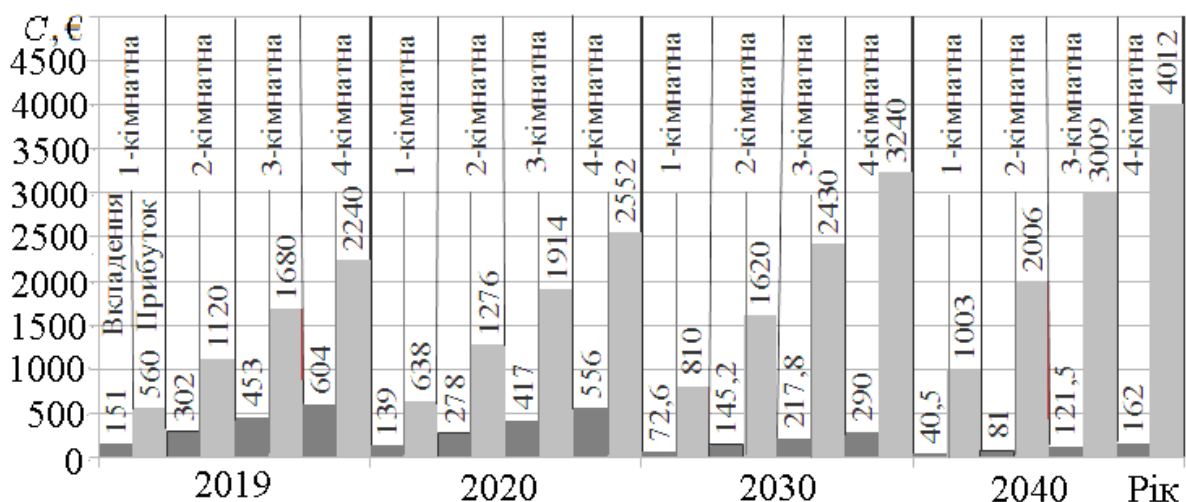


Рисунок 34 – Результат розрахунку вкладень мешканців у відповідний рік і прибутку за «зеленим» тарифом на енергію за період експлуатації сонячного колектора введеного у дію за відповідний рік

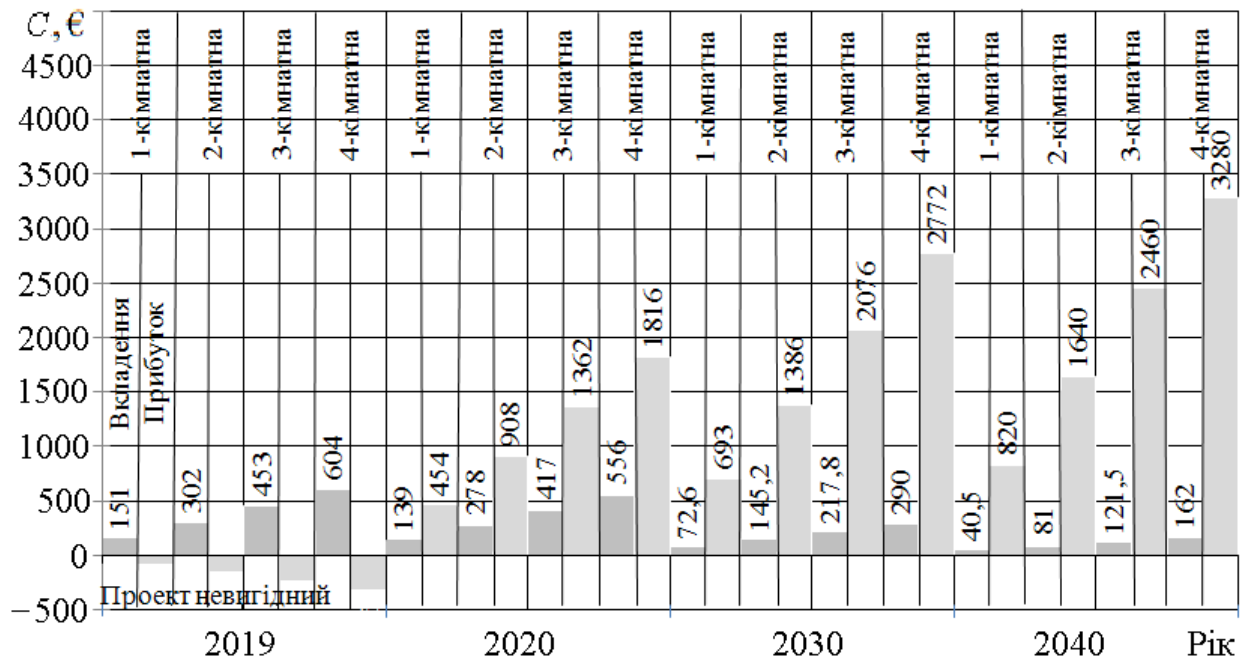


Рисунок 35 – Результат розрахунку вкладень і прибутку за «основним» тарифом на енергію для мешканців кожної квартири за період експлуатації гібридного сонячного колектора введеного у дію за відповідний рік

*Енергетична ефективність* застосування гібридного колектора за період експлуатації, тобто збереження викопного палива, становитиме 19100 т у. п.

*Економічна ефективність* застосування гібридного сонячного колектора, тобто отримання дисконтованого прибутку, та строк окупності проекту, становитиме за роками його встановлення відповідно:

– за «зеленим» тарифом: 2019 р. – 201921 € та 8,3 року; 2020 р. – 230131 € та 7,3 року; 2030 р. – 291592 € та 3,7 року; 2040 р. – 361044 € та 2 роки;

– за «основним» тарифом: 2019 р. – проект збитковий; 2020 р. – 163335 € та 18 років; 2030 р. – 249558 € та 4 роки; 2040 р. – 295342 € та 2 роки.

*Екологічна ефективність* застосування гібридного сонячного колектора, тобто зменшення шкідливих викидів у довкілля, становитиме близько 6355 т.

## ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальну науково-практичну проблему в галузі науки і техніки щодо підвищення рівня достовірності визначення і прогнозування електричного навантаження цивільних об'єктів шляхом розроблення методів і моделей з використанням графічного і макромодельовання та фрактальних властивостей, які дозволяють на стадії проектування створити умови економії енергетичних і матеріальних ресурсів у процесі спорудження та експлуатації систем електропостачання.

Основні результати і рекомендації дисертаційної роботи полягають у такому:

1. Порівняльний аналіз визначення електричного навантаження об'єктів цивільного призначення за нормативними документами з результатами вимірювання

реального значення, виявив значне завищення його за теоретичного обчислення. Це призводить до збільшення капіталовкладень у будівництво та витрат коштів на експлуатацію систем електропостачання, що вимагає розроблення ефективних методів підвищення його достовірності.

2. Використання сучасної виміральної техніки, АСКОЕ дозволило створити електронну базу технічних характеристик найбільш споживаних ЕП житлових будинків, комунальних підприємств, таких як моделі електричного навантаження, електроспоживання з кроком дискретизації мс, с, хв., амплітудного спектру гармонійного складу ЕП з нелінійними характеристиками, коефіцієнтів спотворення кривих за струмом, напругою та інші, що дає можливість підвищити точність відповідних розрахунків.

3. Розроблено нову методику розрахунку електричного навантаження цивільних об'єктів на основі графічного синтезу динаміки навантаження кожного ЕП, об'єктів з використанням моделювання на основі теорії сплайнів, який дозволив у 1,5–3,5 разів підвищити рівень достовірності його визначення, порівняно з обчисленням за чинними нормативними показниками, що підтверджено натурними експериментами на реальних системах електропостачання.

4. Отримав подальшого розвитку метод макромоделювання, як основи прогнозування електричного навантаження об'єктів цивільного призначення, який відрізняється від існуючих використанням дискретних автономних макромоделей, що не потребують попередньої обробки первинної інформації і дає можливість спростити та пришвидшити процес моделювання.

5. Важливим результатом дослідження є доведена самоафінність структури електричного навантаження цивільних об'єктів, отриманого за методом R/S-аналізу апріорної інформації, що підтверджує фрактальний принцип його формування, який дає можливість чисельно оцінити за показником Херста наявність довготривалої пам'яті та її глибину, трендостійкість для прогнозування та передбачення кризових ситуацій.

6. Представлено ефективну методику визначення питомого електричного навантаження жител будинків мікрорайону міста на базі інформації АСКОЕ за моделлю математичного сподівання усереднених функцій, який на відміну від чинних нормативних документів, дозволив значно наблизити результати його обчислення відносно виміряного реального значення у системах електропостачання.

7. Набув подальшого розвитку метод оцінки впливу вищих гармонік, які генеруються ЕП з нелінійними характеристиками, мережевих інверторів на електричне (теплове) навантаження струмовідних частин шляхом моделювання процесів в електричній мережі, що дозволяє передбачати ситуації їх перегрівання при експлуатації.

8. Натурні експерименти на базі устаткування мережевої сонячної електростанції показали суттєвий вплив мережевого інвертора та ЕП з нелінійними характеристиками на додаткове навантаження електричної мережі через генерування вищих гармонік, порівняно з дією першої гармоніки, які підтвердили отримані результати обчислення за запропонованою методикою на базі теорії сплайнів.

9. Розроблена прикладна програма в середовищі MathCad із використанням вбудованої функції «cspline (x, y)» дозволяє підвищити рівень достовірності

величини розрахункового навантаження цивільних об'єктів, що експериментально підтверджено відповідними вимірюваннями у системах електропостачання.

10. Розвинуто методику прогнозування ефективності застосування гібридних сонячних колекторів для енергозабезпечення цивільних об'єктів, що відрізняється від інших урахуванням цін на енергетичному ринку, а саме, прогнозу вартість колекторів, тарифів «основних» і «зелених» на отриману традиційно та сонячну енергію, що дозволило визначити дисконтований прибуток і строк окупності інвестиційного проєкту залежно від року введення в експлуатацію.

11. Основні положення, рекомендації та висновки дисертації оприлюднені в наукових журналах, втілюються у навчальний процес кафедрами ОНПУ під час лекцій, лабораторних та практичних занять, курсового проєктування з дисциплін «Основи електропостачання», «Системи електропостачання», «Особливості електропостачання об'єктів житлово-комунального господарства», «Електропостачання цивільних об'єктів», у кваліфікаційних роботах бакалаврів та у науково-дослідних роботах магістрів, аспірантів.

12. Результати дисертаційної роботи впровадженні у наукові дослідження та проєктну 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.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### *Наукові праці, які опубліковані у журналах, що індексуються у наукометричній базі Scopus*

1. Bondarchuk A.S. Utilization of waste mines as renewable energy accumulators / A.S. Bondarchuk // Scientific Bulletin of the National Mining University. – Dn .: National Mining University, 2016. – № 5, pp. 79–84.
2. Bondarchuk A.S. Development of the graphoanalytic method for calculating electric load at civilian objects / A.S. Bondarchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kh.: 2017. – № 4/8 (88), pp. 4–9.
3. Bondarchuk A.S. Investigation of the influence of highly harmony curves on the calculated loading of the network solar electric station 30 kW power / A.S. Bondarchuk // Scientific Bulletin of the National Mining University. – Dnipro: National Mining University, № 1 (163), 2018. – pp. 74–80.
4. Lezhniuk P.D. Investigation and implementation of the fractal properties of electric load on civilian objects in order to efficiently predict and control electrical consumption / P.D. Lezhniuk, A.S. Bondarchuk, Iu.A. Shullie // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kh.: 2019. – № 3/8 (99), pp. 6–12.
5. Bondarchuk A.S. Study into predicted efficiency of the application of hybrid solar collectors to supply energy to multiapartment buildings / A.S. Bondarchuk // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – Kh.: 2019. – № 4/8 (100), pp. 69–77.
6. Lezhniuk P.D. Application of macromodeling method as bases for forecasting electrical consumption of multiflat houses / P.D. Lezhniuk, A.S. Bondarchuk, O.P. Hoholiuk // Tekhnichna Elektrodynamika. 2019. No 6. Pp. 74–80.

**Наукові праці, які опубліковані у наукових  
періодичних виданнях інших держав**

7. Bondarchuk A.S. Comparative analysis of real dynamics of electric loading of housing microregion of city determined by modeling and normatives / A.S. Bondarchuk, O.P. Hoholyuk, Iu.A. Shullie // The scientific method, ( Warszawa, Poland), 2018, volume 1, number 18, pp. 22–29.

8. Bondarchuk A.S. Research of the efficiency of hybrid solar collectors as sources of electrical and thermal energy for the housing microregion of the city / A.S. Bondarchuk, O.P. Hoholyuk, Iu.A. Shullie // Slovak international scientific journal, 2018, volume 1, № 17, pp. 14–21.

9. Lezhniuk P. D. Fractal analysis of dynamics of electric loading of civil objects/ P. D. Lezhniuk, A. S. Bondarchuk, Iu. A. Shullie // Sciences of Europe (Praha, Czech Republic). – 2018. – № 27 (27), volume 1, pp. 46–54.

10. Bondarchuk A. S., Randle O. O. Investment project on energy supply for residential neighborhood in the city from hybrid solar collectors/A. S. Bondarchuk, O.O. Randle // Polish Journal of Science (Warszawa, Poland), 2019, volume 1, number 18, pp. 57–63.

**Наукові праці, які опубліковані у журналах, що  
внесені до переліку наукових фахових видань України**

11. Бондарчук А. С. Порівняння енергоефективності запровадженої системи зсуву часу в Україні і в високорозвинених країнах / А. С. Бондарчук // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2003. – Вып. 1(19). – С. 97–100.

12. Бондарчук А. С. Вплив зміщення відліку часу на ефективність енерговикористання регіонами України / А. С. Бондарчук // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2004. – Вып. 1(21). – С. 64–66.

13. Розен В. П. Аналіз причинно-наслідкових зв'язків переходу України на енергоефективний літній відлік часу / В. П. Розен, А. С. Бондарчук // Труды Одесского политехн. ун-та. – 2005. – Вып. 1. – С. 48–53.

14. Бондарчук А. С. Базисний енергетичний часовий ряд як інструмент прогнозування енергоефективності сезонного відліку часу / А. С. Бондарчук // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2007. – Вып. 2(28). – С.86–88.

15. Бондарчук А.С. Прогнозування енергоефективності сезонного відліку часу в Україні з урахуванням впливу метеорологічних умов/А.С.Бондарчук//Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2008.– Вып. 1(29). –С.152–156.

16. Бондарчук А.С. Прогнозування енергоефективності від впровадження сезонного відліку часу / А. С. Бондарчук // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2003. – Вып. 60. – С. 58 – 62.

17. Бондарчук А. С. Метод моніторингу динаміки електроспоживання міста Одеси в період до виникнення і в умовах фінансово-економічної кризи / А.С. Бондарчук // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2009. – Вып. 1. – С. 76–79.

18. Бондарчук А. С. Прогностичне оцінювання енергетичного, економічного та екологічного ефекту зрівнювання графіка електричного навантаження міста Одеси / А. С. Бондарчук, В. В. Поносов // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2009. – Вып. 2(32). – С. 84–88.

19. Бондарчук А. С. Визначення оптимальної потужності міських трансформаторних підстанцій з урахуванням нестандартних добових графіків навантаження / А. С. Бондарчук // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2009. – Вип. 74. – С. 48–52.

20. Бондарчук А. С. Априорний аналіз нормативних показників проектування електрообладнання систем електропостачання житлових будинків / А. С. Бондарчук // Електромашинобудування та електрообладнання. – К.: Техніка, 2010. – Вип. 75. – С. 79–82.

21. Бондарчук А. С. Ефективність запровадження диференційованого тарифу на електроенергію для населення за умови використання сучасної електропобутової техніки / А. С. Бондарчук, Д. П. Низова // Труды Одесского политехн. ун-та. – Одесса, 2010. – Вып. 1(33). – С. 95–99.

22. Бондарчук А. С. Кореляційно-регресійний аналіз впливу регіональної зміни клімату на навантаження Одеських електричних мереж і довілля / А. С. Бондарчук // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К.: Техніка, 2011. – № 02 (78). – С. 73–75.

23. Бондарчук А. С. Зіставлення теоретичного і реального розрахункового питомого електричного навантаження жителів в умовах міста Одеси / А. С. Бондарчук, Д. П. Низова // Праці Одеського політехн. ун-ту. – Одеса, 2011. – Вип. 1(35). – С. 78–81.

24. Бондарчук А. С. Прогнозування впливу регіонального потепління на енергоспоживання міста Одеси та на викиди парникових газів / А. С. Бондарчук, В. В. Алексеєва // Праці Одеського політехн. ун-ту. – Одеса, 2012. – Вип. 1(37). – С. 133–136.

25. Бондарчук А. С. Прогнозування та коригування електропостачання підприємств і міст в умовах енергетичної кризи / А. С. Бондарчук // Електричний журнал. – 1999. – № 1(9). – С. 3 – 10.

26. Бондарчук А. С. Оптимізація штучного сезонного зміщення відліку часу за критерієм енергозбереження / А. С. Бондарчук // Електричний журнал. – 2000. – № 2(12). – С. 3 – 10.

27. Бесараб О. М. Кореляційний аналіз впливу сучасних побутових електроприладів на комерційні показання лічильників / О. М. Бесараб, А. С. Бондарчук, Я. О. Соколов // Праці Одеського політехн. ун-ту. – Одеса, 2013. – Вип. 3(42). – С. 123–126.

28. Бондарчук А. С. Прогнозування за аналітичною моделлю тренда динаміки електроспоживання міста / А. С. Бондарчук // Праці Одеського політехн. ун-ту. – Одеса, 2014. – Вип. 4(43). – С. 159–161.

29. Бондарчук А. С. Прогнозна енергетична, економічна та екологічна ефективність запровадження мережевих сонячних електростанцій в ринкових умовах / А. С. Бондарчук // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К.: Наука і техніка, 2015. – № 20 (96). – С. 51–55.

30. Бондарчук А. С. Дослідження впливу струму вищих гармонік на втрати активної потужності в електричній мережі житлового будинку / А. С. Бондарчук, Є. П. Нечипорук // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – К.: Наука і техніка, 2016. – № 20 (97). – С. 56–61.

31. Bondarchuk A. S. A graphic method for the research into electrical load dynamics in residential apartments / A. S. Bondarchuk, P. D. Lezhniuk, // Computational Problems of Electrical Engineering. – Lviv: Lviv Polytechnic National University, volume 7, number 2, 2017. – pp. 73–77.

***Наукова праця, за яку отримано патент України на винахід***

32. Бондарчук А. С. Спосіб автоматичного програмованого коригування відліку часу / А. С. Бондарчук. Патент № 75278 України на винахід, МПК (2006) G04F 5/00. – № 20040807103; опубл. 15.03.2006 р. Бюл. № 3.

***Навчальні посібники з грифом МОН України***

33. Бондарчук А. С. Внутрішньоквартальне електропостачання. Навчальний посібник / А. С. Бондарчук, В. Г. Рудницький. – Суми: Університетська книга, 2012. – 371 с.

34. Бондарчук А. С. Внутрішньобудинкове електропостачання. Навчальний посібник / А. С. Бондарчук. – К: Освіта України, 2015. – 480 с.

**АНОТАЦІЯ**

Бондарчук А. С. Методи і моделі визначення електричного навантаження цивільних об'єктів з використанням графічного і макромодельовання та фрактальних властивостей. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.02 – електричні станції, мережі і системи. – Одеський національний політехнічний університет Міністерства освіти і науки України, Одеса, 2020.

Дисертаційна робота присвячена теоретичному узагальненню і вирішенню важливої науково-практичної проблеми в галузі науки і техніки щодо дослідження процесів і достовірного визначення електричного навантаження у системах електропостачання (СЕП) цивільних об'єктів. Розв'язання проблеми здійснено шляхом розроблення методів і математичних моделей щодо підвищення достовірності визначення і прогнозування електричного навантаження та уточнення нормативних показників на проєктування СЕП, що сприятиме економії енергетичних ресурсів, капітальних витрат на спорудження та експлуатацію СЕП, зниження негативної дії на довкілля. За результатами дослідження створено концептуально новий метод розрахунку електричного навантаження цивільних об'єктів шляхом графічного синтезу динаміки складових навантаження з використанням модельовання за теорією сплайнів, який надав можливість у 1,5–3,5 разів підвищити достовірність його визначення, порівняно з обчисленням за чинними нормативними показниками, що експериментально підтверджено на реальних СЕП об'єктів. Доведена самоафінність структури електричного навантаження цивільних об'єктів та встановлено, за методом R/S-аналізу ретроспективної інформації, фрактальний принцип його формування, який надає можливість чисельно оцінити за показником Херста наявність довготривалої пам'яті та її глибину, трендостійкість для прогнозування та виявлення кризових інтервалів часового ряду, в періоди яких можливі аварійні ситуації в СЕП. Застосовано метод модельовання

електричного навантаження об'єктів цивільного призначення за математичним макромодельованням, який відрізняється від існуючих методів використанням дискретних макромоделей без попередньої обробки первинної інформації, що дає можливість пришвидшити процес моделювання. З метою підвищення рівня достовірності визначення електричного навантаження цивільних об'єктів розроблено метод моделювання електричного навантаження житлових будинків та його прогнозування шляхом графічного синтезу осцилограм ЕП, результати якого експериментально підтверджено вимірюваннями на реальних об'єктах. Створено метод визначення питомого електричного навантаження на житло багатоповерхових будинків за моделлю математичного сподівання усереднених функцій, який на відміну від чинних нормативних документів, дозволив підвищити точність його обчислення. Удосконалений метод оцінки впливу вищих гармонік, які генеруються нелінійними ЕП, джерелами відновлювальної енергії, на електричне, теплове навантаження струмовідних частин, шляхом моделювання за теорією сплайнів процесів в електричній мережі, що надає можливість попереджувати критичні ситуації їх перегрівання. Розроблено графічну методику прогнозування ефективності застосування гібридних сонячних колекторів для енергозабезпечення житлових будинків, що відрізняється від інших урахуванням цін на енергетичному ринку та визначенням дисконтованого прибутку і строку окупності інвестиційного проєкту. Створено основу електронної бази моделей характеристик ЕП, цивільних об'єктів, використання якої підвищуватиме достовірність визначення розрахункового навантаження при проєктуванні СЕП.

**Ключові слова:** цивільні об'єкти, електричне навантаження, графіки, макромодельовання, фрактали, гармоніки, економія енергоресурсів.

### ABSTRACT

Bondarchuk A. S. Models and methods for increasing the accuracy of calculating the electric loading of civilian objects using graphic, macromodeling and fractal properties. – On the rights of the manuscript.

Thesis for obtaining the scientific degree of the doctor of technical sciences in the specialty 05.14.02 – Electric power stations, networks and systems. Odessa National Polytechnic University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Odessa, 2020.

The dissertation is devoted to theoretical synthesis and decision of an important scientific and practical problem in the field of science and technology concerning the study of processes and precise determination of electrical load in power supply systems of civilian objects. The problem solving was accomplished by developing methods and mathematical models for increasing the accuracy of the determination and prediction of electric load and clarification of normative indicators for the design of the power supply systems of civilian objects for civilian use, which will create conditions for energy resource savings, capital costs for the construction and operation of the power supply systems, and reduce the negative impact on the environment. According to the results of the study, a conceptually new approach was developed and a method for calculating the electric loading of civilian objects by graphically synthesizing their load dynamics using simulation based on the theory of splines, which allowed 1.5–3.5 times to increase the



accuracy of its definition, compared with calculation by current normative indicators, which is experimentally confirmed on real objects. The self-determination of the structure of the electrical load of civilian objects was proved and the fractal principle of its formation was established on the basis of the R/S analysis of retrospective information. It made it possible to estimate numerically the presence of long-term memory and its depth, trend stability for the identification of time intervals of the time series. Based on the improvement of the method of forecasting the dynamics of electrical loading of civil objects by mathematical macromodeling, which differs from the existing use of discrete macromodels, much better accuracy of its forecast for other methods was obtained. In order to increase the accuracy of the determination of the electric load of civilian objects, a method for modeling the electric load of residential buildings and its forecasting is developed by graphic synthesis of oscillograms of electric receivers, the results of which have been experimentally confirmed on real objects. A method for determining the specific electric load on the dwelling of multi-storey houses was created based on the model of the mathematical expectation of averaged functions which, unlike the current normative documents, allowed increasing the accuracy of its calculation. On the basis of the improved method of estimating the influence of higher harmonics generated by nonlinear of electric receivers, the sources of renewable energy on electric, thermal load of current-carrying parts by simulating processes in the electric network, it was possible to prevent critical situations of their overheating. A technique for forecasting the energy, economic and environmental efficiency of using hybrid solar collectors for the energy supply of multi-storey residential buildings has been developed, which differs from other ones by considering the prices in the energy market and determining the discounted profit and payback period of the investment project.

**Keywords:** civil objects, electric load, graphs, macromodeling, fractals, harmonics, energy saving

### АННОТАЦИЯ

Бондарчук А. С. Методы и модели определения электрической нагрузки гражданских объектов с использованием графического и макро моделирования, фрактальных свойств. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.02 – электрические станции, сети и системы.

Одесский национальный политехнический университет Министерства образования и науки Украины, Одесса, 2020.

Диссертация посвящена теоретическому обобщению и решению важной научно-практической проблемы в области науки и техники по исследованию процессов и точного определения электрической нагрузки в системах электроснабжения (СЭС) гражданских объектов. Решение проблемы осуществлено путем разработки методов и математических моделей повышающих точность определения и прогнозирования электрической нагрузки, уточнения нормативных показателей на проектирование СЭС гражданского назначения, которые способствуют экономии энергетических ресурсов, капитальных затрат на сооружение и эксплуатацию СЭС, снижения негативного воздействия на окружающую среду. Проблема точного определения электрической нагрузки объектов гражданского назначения требу-

ет нового подхода с учетом работы ЭП с нелинейной характеристикой, существенного генерирования ими электромагнитных помех, применения возобновляемых источников энергии, инновационных технологий, поскольку использование действующих нормативных документов приводит к превышению реальной нагрузки, о чем свидетельствуют результаты проведенных исследований. В связи с этим по результатам экспериментальных исследований создан концептуально новый подход и разработан метод расчета электрической нагрузки таких объектов путем графического синтеза динамики составляющих нагрузки с использованием моделирования на основе теории сплайнов, который дал возможность в 1,5–3,5 раза повысить точность его определения по сравнению с вычислением по действующим нормативным показателям. Разработан метод моделирования электрической нагрузки гражданских объектов и его прогнозирования путем графического синтеза осциллограмм ЭП, что значительно повышает его точность, результаты которого экспериментально подтверждены на реальных объектах. Разработана программа в среде MathCad с использованием встроенной функции  $cspline(x, y)$  с продолжением интерполяционной кривой кубической параболой, которая позволяет получить более точную величину расчетной нагрузки многоквартирных домов микрорайона города по сравнению с другими методами. Доказана самоаффинность структуры динамики нагрузки гражданских объектов и установлено методом R/S-анализа ретроспективной информации фрактальный принцип его формирования, который дал возможность численно оценить по показателю Хэрста наличие долговременной памяти и ее глубину, трендостойкость для прогнозирования и выявления кризисных интервалов временного ряда. Применен метод макро моделирования, который отличается от существующих использованием дискретных автономных макромоделей без предварительной обработки первичной информации. Апробация математических макромоделей электропотребления показала их способность представлять адекватную информацию. Метод оценки влияния высших гармоник, генерируемых ЭП с нелинейными характеристиками, на нагрузку токоведущих частей путем моделирования процессов в электрической сети с использованием теории сплайнов, дает возможность предупреждать их перегревание. Разработана методика прогнозирования эффективности применения гибридных солнечных коллекторов для энергоснабжения многоэтажных жилых домов, которая отличается от других учетом цен на энергетическом рынке и определением дисконтированного дохода, срока окупаемости инвестиционного проекта. В работе даны результаты исследования и создана основа электронной информационной базы моделей особенностей технических данных ЭП с нелинейными характеристиками, объектов гражданского назначения, которая сформирована с помощью современных информационных технологий. Использование такой информационной базы повысит точность определения расчетной нагрузки при проектировании систем электроснабжения объектов гражданского назначения.

**Ключевые слова:** гражданские объекты, электрическая нагрузка, графики, макро моделирование, фракталы, гармоники, экономия энергоресурсов.