

**ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ
ІВАНА ПУЛЮЯ**

Марценко Сергій Володимирович

УДК 620.92:519.218

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА СТАТИСТИЧНІ МЕТОДИ
ОБРОБКИ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ В ЗАДАЧАХ МОНІТОРИНГУ
ЕЛЕКТРОНАВАНТАЖЕННЯ**

01.05.02 - математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

**дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук**

Тернопіль – 2011

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України

Науковий керівник – доктор технічних наук, професор, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки
Щербак Леонід Миколайович,
Національний авіаційний університет,
Інститут інформаційно-діагностичних систем (м. Київ),
професор кафедри інформаційно-вимірювальних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Матвійчук Ярослав Миколайович,
Інститут підприємництва та перспективних технологій при
Національному університеті “Львівська політехніка”
(м. Львів), завідувач кафедри інформаційних систем та
технологій.

доктор технічних наук, доцент
Лупенко Сергій Анатолійович,
Тернопільський національний технічний університет
імені Івана Пулюя (м. Тернопіль),
завідувач кафедри комп’ютерних систем та мереж.

Захист відбудеться “____” _____ 2011 р. о “____” год. “____” хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради **К 58.052.01** в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79

З дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56

Автореферат розісланий “____” травня 2011 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради, к.ф.-м.н.

Шелестовський Б.Г.

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Зважаючи на складні умови перехідної економіки та стан енергетичних галузей, керівництву підприємств і організацій необхідно вирішувати задачі, пов'язані з використанням електроресурсів. Постійне здорожчання електроенергії вимагає від керівництва ефективного впровадження енергозберігаючих технологій, а функціонування складних енергоємних і дорогих в фінансовому відношенні апаратно-програмних комплексів – забезпечення безперебійного живлення. Ефективне управління інтенсивністю електроспоживання і адаптація споживання електричної енергії до сучасних умов тарифікації енергії, проведення енергетичного аудиту для розробки енергетичного паспорту організації є питаннями, що потребують дослідження для розробки концепції функціонування організації та розвитку країни в цілому.

Для вчасного виявлення та подальшого усунення проблем, пов'язаних з використанням електроресурсів, необхідно здійснювати постійний моніторинг процесу електронавантаження організації. Останнім часом гостро постала необхідність запровадження в організаціях автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії. Запорукою їх успішного функціонування є наявність адекватних методів аналізу електронавантаження організації. Розробці методів статистичного аналізу будь-якого сигналу передуює етап побудови його математичної моделі. Таким чином, математичне моделювання процесу електронавантаження в задачах моніторингу електронавантаження організації є важливою і актуальною проблемою.

У літературі, пов'язаній з дослідженням електронавантажень, авторами Барановим Г.Л., Гаммом А.З., Марченком Б.Г., Приймаком М.В., Шидловським А.К., запропоновано низку моделей, що описують роботу регіонів та великих енергосистем. Такі моделі адекватно описують процеси, що відбуваються на цих рівнях електронавантаження. Проте електронавантаження організації має ряд специфічних особливостей, які нівелюються при акумуляції електронавантажень організацій зі змінами режимів роботи. До таких особливостей можна віднести нерівномірність електронавантаження протягом доби, різні графіки роботи організацій впродовж тижня, сезонність та ін.

Лише невелика кількість робіт висвітлює питання, пов'язані з задачами моніторингу, моделювання та аналізу електронавантажень окремих організацій і загалом недостатньо відображають всі аспекти формування та динаміки таких процесів, що притаманні організаціям зі змінними режимами роботи.

Вказані вище недоліки зумовлені недостатнім розвитком моделювання процесу електронавантаження окремої організації, що дає підставу сформулювати задачу розробки нової моделі процесу електронавантаження, яка б враховувала його стохастичність, циклічність, зміни режимів роботи організації і на основі розробленої моделі обґрунтувати нові методи статистичної обробки та імітаційного моделювання, які б підвищили точність й достовірність аналізу та моделювання даного процесу.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відповідності з дослідженнями, які проводились у

Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за замовленням Міністерства освіти і науки України у галузі фундаментальних досліджень у рамках науково-дослідних робіт: “Інформаційно-обчислювальна система обліку, аналізу та прогнозу енергоносіїв в задачах підвищення ефективності енергозбереження” (№ держ. реєстр. 0110U002262); “Розробка на основі періодичних ланцюгів Маркова методів статистичного аналізу і прогнозу енергонавантажень” (№ держ. реєстр. 0105U000743).

Роль автора при виконанні даних НДР така: обґрунтовано модель процесу електронавантаження у класі періодичних випадкових процесів; розроблено алгоритми для статистичної обробки та комп’ютерного моделювання даних вимірювань електронавантаження організацій.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є удосконалення математичної моделі та розробка статистичних методів обробки даних вимірювань процесу електронавантаження організацій в апаратно-програмних комплексах моніторингу електронавантаження організацій.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз наукових публікацій, результатів науково-дослідних робіт щодо створення і експлуатації автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ), обґрунтувати науково-технічну задачу математичного моделювання та розробки статистичних методів обробки даних вимірювань процесу електронавантаження організацій для задач його моніторингу.
2. Розробити удосконалену математичну модель стохастичного процесу електронавантаження для визначення його основних характеристик у задачах моніторингу електронавантаження організацій.
3. На основі розробленої моделі обґрунтувати методи статистичної обробки даних вимірювань електронавантажень.
4. Розробити алгоритми і програмне забезпечення для комп’ютерного моделювання процесу електронавантаження з метою верифікації математичної моделі.
5. Розробити проект апаратно-програмного комплексу для моніторингу та прогнозу процесу електронавантаження організацій.

Об’єкт досліджень – процес моделювання та обробки електронавантаження організації на коротких (доба, тиждень, місяць) та тривалих інтервалах спостереження (квартал, рік).

Предмет дослідження – математична модель та статистичні методи обробки процесу електронавантаження організації з метою розробки апаратно-програмного комплексу моніторингу процесу електронавантаження.

Методи дослідження: теорія випадкових процесів та математичного моделювання для розробки удосконаленої математичної моделі процесу електронавантаження організації, методи математичної статистики та обчислювальні методи для обґрунтування статистичних методів обробки його даних вимірювань, методи імітації випадкових процесів.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше обґрунтовано математичну модель процесу електронавантаження організацій у вигляді кусково-періодичного випадкового процесу з некорельованими значеннями (білого шуму), що дало змогу поряд із врахуванням стохастичності, циклічності електронавантаження та змін режимів роботи організацій, конкретизувати ймовірнісні характеристики процесу електронавантаження, які відповідають кожному режиму роботи організації та зменшити обчислювальну складність методів обробки та імітації процесу електронавантаження.
2. Вперше отримано загальний аналітичний вигляд ймовірнісних характеристик кусково-періодичного випадкового процесу електронавантаження, що дає можливість застосовувати відомі статистичні методи їх оцінювання з урахуванням змін режимів роботи організацій.
3. Вперше, на відміну від існуючих методів t -статистик та F -критерію Фішера для ідентифікації періодичних компонентів процесу електронавантаження, запропоновано і статистично обґрунтовано використання методу кластерного аналізу, який має більшу гнучкість, стійкість та дає змогу проводити виділення компонентів нестационарних процесів за меншу кількість операцій, що підвищує достовірність та ефективність статистичних методів обробки даних вимірювань електронавантаження організацій.
4. Вперше запропоновано метод добового прогнозу електроспоживання організації в залежності від температури навколишнього середовища, що дає змогу здійснювати прогноз витрат електроенергії організацією із відомою точністю та достовірністю.

Практичне значення результатів дисертації:

1. Розроблено алгоритмічне та програмне забезпечення для статистичної обробки даних вимірювань електронавантаження організації, яке може бути використане в службах керування електроспоживанням та електронавантаженням для прийняття рішень із оптимізації завантаженості електромережі організації.
2. Для вирішення задач моніторингу електронавантаження організації створена база даних вимірювань даних електронавантаження з інформаційними параметрами електроспоживачів, динаміки їх функціонування, а також із урахуванням метеорологічних факторів, що дає змогу контролювати відхилення параметрів електромережі від типових для даної організації.
3. Розроблено проект апаратно-програмного комплексу моніторингу електронавантаження організації, впровадження якого підвищує рівень обґрунтованості прийнятих рішень з оптимізації впровадження енергозберігаючих технологій та забезпечує контроль пікових навантажень в електромережі.

Результати дисертації впроваджені в:

- а) ВАТ «Тернопільське конструкторське бюро радіозв'язку «Стріла» при розробці проекту комп'ютеризованого апаратно-програмного комплексу моніторингу електронавантаження;

- б) зернопереробний цех ПП Алексевича В.Я. при розробці методики виділення режимів роботи організації (робочих та вихідних днів), прогнозу добового електроспоживання з врахуванням середньодобової температури;
- в) навчальний процес Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя.

Особистий внесок здобувача. Нові наукові та практичні результати, що ввійшли до дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, автором дисертації у роботі [7] проведено обґрунтування сукупності задач моніторингу процесу електронавантаження організації; у [10] запропоновано і обґрунтовано систему для вимірювання основних характеристик процесу електронавантаження, що дозволила у подальшому провести розв'язок статистичних задач моніторингу; у [11] проаналізовано математичну модель у вигляді лінійного випадкового процесу; у [3] статистично обґрунтовано математичну модель добового електронавантаження організацій у вигляді кусково-однорідного випадкового процесу з некорельованими значеннями; у [9] запропоновано і статистично обґрунтовано метод визначення однорідних компонентів процесу електронавантаження; у [8] здійснено статистичний аналіз даних вимірювань електронавантаження навчального закладу; у [2] запропоновано методику побудови добового прогнозу електроспоживання в залежності від середньодобової температури навколишнього середовища.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались та обґрунтовувались на наступних міжнародних та національних конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2010 р.); науково-технічні конференції «Моделювання» (Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова, м. Київ, 2007 р., 2008 р., 2009 р., 2011 р.); одинадцята, дванадцята наукові конференції Тернопільського державного технічного університету (м. Тернопіль 2007 р., 2008 р.).

Результати дисертації обговорювались на семінарах кафедри комп'ютерних наук, семінарі відділу теоретичної електроніки (№12) Інституту електродинаміки Національної Академії наук України, семінарі кафедри інформаційних систем та мереж Національного університету «Львівська політехніка».

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 11 публікаціях, 5 із них – статті в наукових фахових виданнях України (з них 1 без співавторів), 6 – тези доповідей науково-технічних конференцій.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 126 найменувань, містить 37 рисунків, 6 таблиць, 2 додатки. Повний обсяг дисертації складає 149 сторінок, основний зміст викладено на 125 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розглянуто питання актуальності теми дисертації, визначені зв'язок роботи з науково-дослідними темами, визначена мета і завдання досліджень, сформульовані об'єкт, предмет і методи дослідження, наведені основні наукові

результати виконаних досліджень, їх практичне значення, а також висвітлені основні результати апробації результатів дисертації в наукових працях і науково-технічних конференціях.

В першому розділі на основі проведеного аналізу публікацій щодо процесу електронавантаження організацій визначено фактори його формування в результаті чого сформульовано основні задачі моніторингу процесу електронавантаження. Під моніторингом електронавантаження організації розуміється проведення однотипних замірів його параметрів з відслідковуванням динаміки їх змін у часі, а також розв'язування наступних задач:

а) *короткострокового моніторингу*:

- вимірювання та реєстрація поточних характеристик електронавантаження таких, наприклад, як: усереднених за 15, 30 хвилин, годину статистичних оцінок потужності, струму, напруги;
- вимірювання та реєстрація основних характеристик якості електроенергії, таких, наприклад, як статистичних оцінок напруги, частоти по кожній фазі, активної та реактивної енергії та інше.

б) *довгострокового моніторингу*:

- використання математичної моделі електронавантаження і обґрунтування пропозицій з її адаптації до особливостей і характеру формування електронавантаження організації та визначення його основних статистичних характеристик;
- прогнозування електронавантаження в залежності від метеофакторів та інших діючих факторів;
- обґрунтування методів, алгоритмів та програмного забезпечення комп'ютерного моделювання реалізацій процесу електронавантаження організацій;
- розробки відповідної бази даних електронавантаження з подальшим створенням бази знань електронавантаження організації.

Для вирішення задач вимірювання поточних характеристик електронавантаження та їх основних характеристик якості проведено аналіз існуючих методів вимірювання та вимірювальних приладів, наведено основні характеристики якості електроенергії.

З метою обґрунтування математичної моделі електронавантаження проведено аналіз відомих моделей енергонавантажень, у результаті якого виявлено, що при математичному моделюванні та статистичній обробці даних вимірювань в електроенергетиці використовують детермінований та стохастичний підходи. Для опису процесу електронавантаження детермінований підхід втратив свою актуальність і не може бути застосований, оскільки сам процес має яскраво виражену випадкову природу, тому результати відповідних досліджень не будуть достовірними. При описі процесів, в яких спостерігається випадковість, доцільно використовувати стохастичний підхід. Також, слід зазначити, що процес електронавантаження має циклічний характер, зумовлений добовим обертанням Землі навколо своєї осі і пов'язаним з цим характером роботи та життя людей. В роботах авторів Баранова Г.Л., Марченка Б.Г., Приймака М.В. для опису таких

процесів використано періодично-корельовані випадкові процеси (ПКВП) і лінійні періодичні випадкові процеси (ЛПВП). Проте обидві моделі не дають змоги враховувати зміни режимів роботи організації. Зокрема, використання цих процесів передбачає незмінність ймовірнісних характеристик процесу через період часу T . Дослідження показали, що, для прикладу, статистичні характеристики процесу електронавантажень організації зі змінами режимів роботи значно відрізняються (наприклад, вихідні і робочі дні). Статистичний аналіз даних за допомогою відомих методів обробки періодичних процесів без врахування цих особливостей призводить до неадекватних результатів. Вищенаведені проблеми зумовлюють певні труднощі в застосуванні моделей ПКВП та ЛПВП для опису процесу електронавантаження загалом.

У роботах Щербак Т.Л. запропонована загальна модель, котра враховує зміни статистичних характеристик випадкових періодичних процесів. Цю модель можна віднести до класу випадкових процесів з “розладкою”, теоретичні основи яких закладено в роботах А.М. Ширяєва. Загальна модель Щербак Т.Л., по суті, не конкретизує компоненти моделі і потребує подальших досліджень для її уточнення.

Результати порівняння характеристик існуючих моделей процесу електронавантаження наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика математичних моделей електронавантаження

	Відомі математичні моделі							Нова модель
	Детерміновані			Стохастичні				
	Детермінована функція, що описує електронавантаження за 1 добу	Системи кускових поліномів	Сплайни	ПКВП	Стохастично періодичний процес	Лінійний періодичний ВП	Кусково-однорідний періодичний випадковий процес	Кусково-періодичний білий шум
Враховує випадковість електронавантаження	—	—	—	+	+	+	+	+
Враховує циклічність електронавантаження	—	+	+	+	+	+	+	+
Враховує зміну режимів роботи організації	—	—	—	—	—	—	+	+
Конкретизує ймовірнісні характеристики електронавантаження, що відповідають кожному режиму роботи організації	—	—	—	—	—	—	—	+
У явній формі задає конструкцію алгоритму імітації	+	+	+	—	—	+	—	+

Проведений порівняльний аналіз існуючих математичних моделей електронавантаження дозволив виявити певні недоліки відомих моделей, які є суттєвими для аналізу, а тому існує об’єктивна необхідність обґрунтування нової

моделі електронавантажень та розробки методів статистичної обробки і прогнозу електронавантаження на її основі для розв'язування задач моніторингу.

Другий розділ присвячений обґрунтуванню математичної моделі процесу електронавантаження, визначенню її основних характеристик і використанню в статистичних задачах моніторингу електронавантаження.

Для розв'язування задач моніторингу електронавантаження запропоновано послідовність етапів (рис. 1.), яка дає змогу врахувати особливості формування процесу електронавантаження та обґрунтувати методи статистичної обробки даних вимірювання електронавантаження.

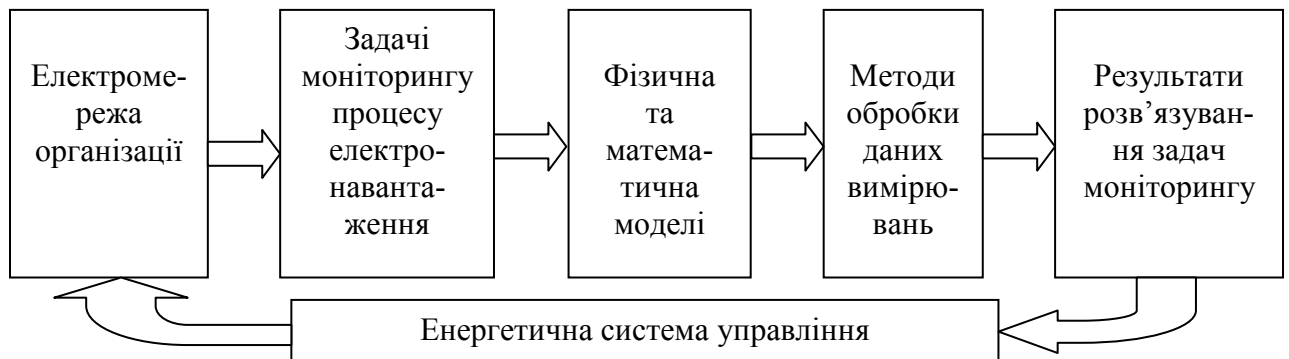


Рис. 1. Схема моніторингу процесу електронавантаження

При дослідженнях фізичної моделі процесу електронавантаження в наукових працях зустрічаються різні значення періоду такого процесу, наприклад, доба, тиждень, місяць, сезон і навіть рік. У даній дисертації вибрано добовий період $T_0 = 24$ години, оскільки з фізичної точки зору часовий інтервал обертання Землі навколо своєї осі є основним періодом, який породжує низку ритмічних явищ у природі, в діяльності людини, в роботі організацій, а інші періоди (тижневий, місячний) є кратними добовому.

Враховуючи дискретний характер вимірювань, у дисертації вибрано крок дискретизації Δt , який дорівнює $\Delta t = 15$ хвилинам. Практично в усіх відомих випадках вимірювань споживання електричної енергії $\Delta t \in \{30 \text{ хв}, 60 \text{ хв}\}$. Вибір таких кроків дискретизації є прийнятним при дослідженні електронавантаження великих енергосистем, де специфіка формування сигналу не враховує діяльність окремих організацій. Подальші статистичні дослідження, результати яких наведено у дисертації, підтверджують той факт, що зменшення кроку дискретизації процесу електронавантаження збільшує інформативність його характеристик.

Електронавантаження та електроспоживання є функціонально зв'язаними. Функція $W(t)$ – спожита електроенергія, вимірюється у ват-годинах (Вт-год) і є функцією приростів потужності. Функція $P(t)$ характеризує динаміку зміни потужності електронавантаження на інтервалі часу $t \in [0, T]$ і вимірюється у ватах (Вт). Апаратно-програмний комплекс моніторингу електронавантаження здійснює вимірювання потужності електронавантаження з кроком дискретизації $\Delta t = \frac{T}{n}$, тобто реєструється послідовність відліків $P(j\Delta t)$, $j = 1, 2, \dots, n$. Тоді спожита

електроенергія (електроспоживання) визначається як $\tilde{W}(t) = \sum_{j=1}^n \tilde{P}(j\Delta t)\Delta t$. Значення

потужності $\tilde{P}(j\Delta t)$ є усередненим значенням неперервної функції $P(t)$ на інтервалі Δt .

Таким чином, у дисертації основним завданням є дослідження послідовності потужностей електронавантаження, що задані на рівномірній часовій ґратці.

Електронавантаження має стохастичний характер і формується як сума впливів різнотипних споживачів. На рис. 2 показано приклад реалізації електронавантаження корпусу №1 Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (ТНТУ ім. Івана Пулюя), де має місце два режими роботи – робочі та вихідні дні. При побудові моделі потрібно врахувати не тільки стохастичний характер електронавантаження, циклічність та зміну режимів роботи організації, але і те, що вона повинна використовуватись в комп'ютеризованому апаратно-програмному комплексі моніторингу електронавантаження організації.

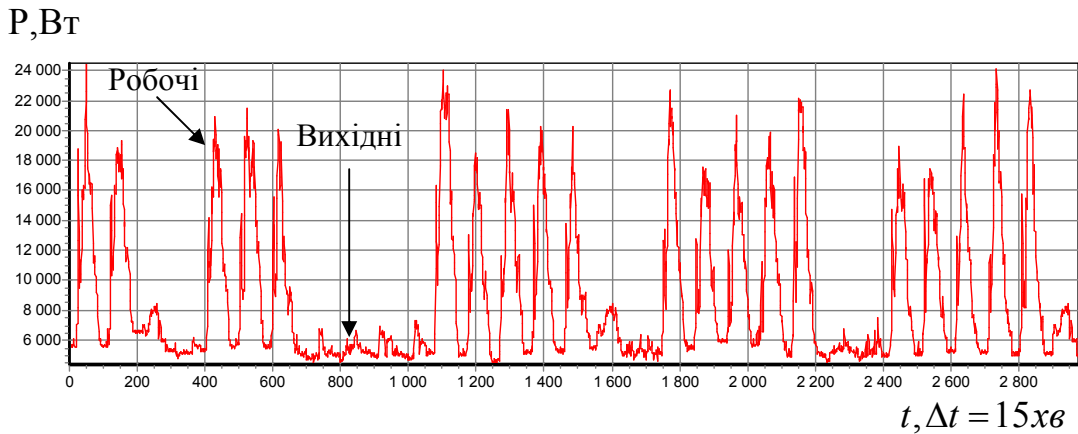


Рис.2. Електронавантаження корпусу №1 ТНТУ ім. Івана Пулюя на місячному часовому інтервалі

Як модель електронавантаження організації обґрунтовано випадкову послідовність виду:

$$\xi_t = \sum_{k=1}^m \zeta_{kt} I_{T_k}(t), \quad t \in \mathbf{Z}, \quad (1)$$

де $T_k \subset \mathbf{Z}$, $T_k \neq \emptyset$, $k = \overline{1, m}$, $T_i \cap T_j = \emptyset$, $i \neq j$, $i, j = \overline{1, m}$, $\bigcup_{k=1}^m T_k = \mathbf{Z}$;

ζ_{kt} – k -та компонента зображення (1), що є періодичним (з періодом 24 години) білим шумом у широкому розумінні (тобто, процесом з некорельованими значеннями), $k = \overline{1, m}$; компоненти моделі (1) утворюють векторний періодичний білий шум: $(\zeta_{1t}, \zeta_{2t}, \dots, \zeta_{mt})$;

$I_{T_k}(t) = \begin{cases} 1, & t \in T_k, \\ 0, & t \notin T_k \end{cases}$ – індикаторна функція.

У моделі (1) область T_k відповідає k -му режиму роботи організації. На рис. 3 схематично зображені дві області для організації з двома режимами роботи.

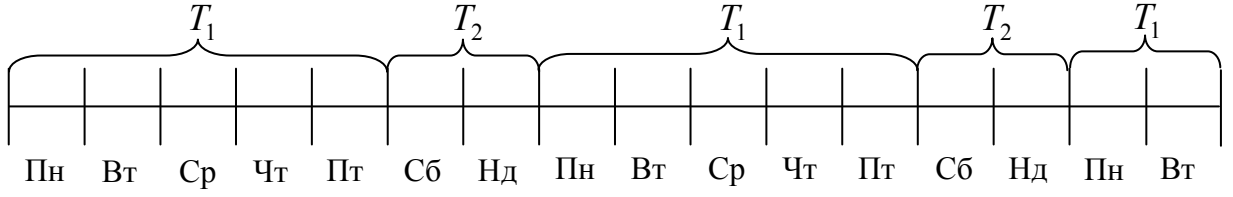


Рис. 3. Схематичне зображення режимів роботи організації:
 T_1 - робочі дні, T_2 - вихідні дні

Модель (1) названо кусково-періодичним білим шумом з дискретним часом. До характеристик моделі (1), які можуть бути використані в задачах моніторингу електронавантаження організацій, слід віднести:

- кількість компонент процесу m ;
- сукупність часових областей T_k , $k = \overline{1, m}$;
- математичне сподівання процесу (1):

$$m_{\xi_t} = \mathbf{M}\{\xi_t\} = \sum_{k=1}^m a_{kt} I_{T_k}(t), \quad t \in Z,$$

де $a_{kt} = \mathbf{M}(\zeta_{kt})$ - математичне сподівання k -ї компоненти процесу (1);

- дисперсія процесу (1):

$$d_{\xi_t} = \mathbf{D}(\xi_t) = \sum_{k=1}^m \sigma_{kt}^2 I_{T_k}(t), \quad t \in Z,$$

де $\sigma_{kt}^2 = \mathbf{D}(\zeta_{kt})$ - дисперсія k -ї компоненти процесу (1);

- одновимірна функція розподілу процесу (1):

$$F(x, t) = \sum_{k=1}^m F_k(x, t) I_{T_k}(t), \quad t \in Z,$$

де $F_k(x, t)$ - функція розподілу k -ї компоненти процесу (1).

Оскільки компоненти моделі (1) є періодичними білими шумами, то періодичними є їх ймовірнісні характеристики, а саме:

$$a_{k,t} = a_{k,t+L}, \quad \sigma_{k,t} = \sigma_{k,t+L}, \quad F_k(x, t) = F_k(x, t+L), \quad k = \overline{1, m},$$

$$\text{де } L = \frac{T}{\Delta t} = \frac{24 \text{ год.}}{0,25 \text{ год.}} = \frac{1440 \text{ хв.}}{15 \text{ хв.}} = 96.$$

Таким чином, розроблена у роботі математична модель електронавантаження у вигляді процесу з некорельованими значеннями відображає основні закономірності формування електронавантажень, циклічність досліджуваного сигналу, режими роботи організації та може бути використана для розв'язання задач моніторингу процесу електронавантаження, допускаючи визначення своїх характеристик за результатами експериментальних досліджень. Верифікацію запропонованої моделі наведено в третьому розділі дисертації.

Третій розділ дисертації присвячений методам обробки, прогнозування та імітації процесу електронавантаження. Обробка здійснюється в наступній послідовності (рис. 4).

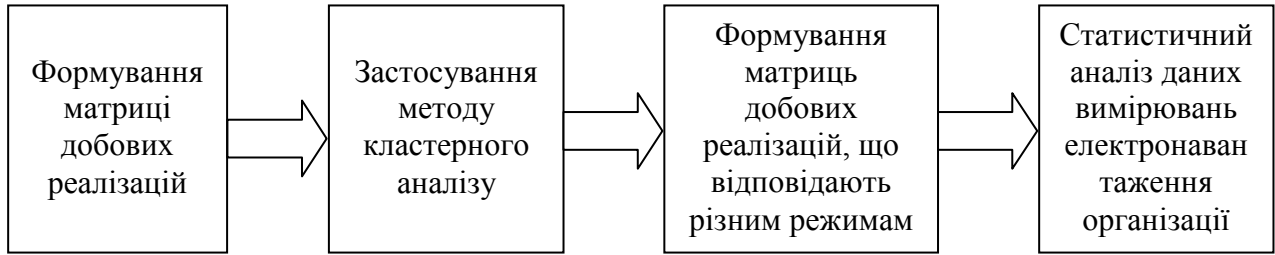


Рис. 4. Схема етапів обробки даних вимірювань електронавантаження організації

Першим етапом процедури обробки даних вимірювань є формування матриці електронавантажень на місячному часовому інтервалі спостереження у вигляді (2).

$$\begin{pmatrix} \eta_{11} & \eta_{12} & \dots & \eta_{1L} \\ \eta_{21} & \eta_{22} & \dots & \eta_{2L} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \eta_{v1} & \eta_{v2} & \dots & \eta_{vL} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де $\eta_{ij} = \xi_{(i-1)L+j}$ $i = \overline{1, v}$, $j = \overline{1, L}$ – реалізація за i -ту добу.

Для кластеризації матриці (2), а саме розбиття її на підматриці, кожна з яких належить одному режиму роботи організації, обґрунтовано метод кластерного аналізу з використанням Евклідової метрики відстаней між досліджуваними реалізаціями добових вимірювань.

Суть методу кластерного аналізу для формування матриць добових реалізацій, що відповідають різним режимам роботи організації полягає в наступному:

- a) для кожної пари рядків η_{hj} та η_{gj} матриці (2) обчислюється Евклідова метрика, тобто:

$$d_{hg} = \left[\sum_{j=1}^L (\eta_{hj} - \eta_{gj})^2 \right]^{1/2}, \quad h, g = \overline{1, v}; \quad h \neq g. \quad (3)$$

- b) за результатами попереднього статистичного аналізу вибирається емпіричний поріг s для виділення реалізацій, що належать конкретному режиму роботи;
- c) формулюються дві гіпотези:
основна H_0 - реалізації належать одному і тому ж режиму роботи організації і альтернативна H_1 - не належать;
- d) здійснюється перевірка гіпотез, згідно правила $d_{hg} \leq s$ приймається гіпотеза H_0 , у іншому випадку ($d_{hg} > s$) приймається гіпотеза H_1 ;
- e) за результатами виконання операції d) формується матриця добових реалізацій, що належать одному режиму роботи організації;

f) за результатами повторних виконань операцій а)...е) формуються матриці добових реалізацій, що належать різним режимам роботи організації.

Значення порогу s визначається згідно такої послідовності кроків:

- а) проводиться попередня статистична обробка даних вимірювань, що належать наперед відомому режиму роботи організації (робочі, вихідні);
 б) на основі відстаней d_{hg} , $h > g$, що пораховані згідно запропонованого методу, будується варіаційний ряд для тих рядків матриці, які відповідають одному режиму роботи;

$$d^{(1)}, d^{(2)}, d^{(3)}, \dots, d^{(n)}; \quad d^{(1)} < d^{(2)} < d^{(3)} < \dots < d^{(n)}, \quad (4)$$

де n - кількість значень варіаційного ряду,

- с) знаходиться непараметрична оцінка квантиля розподілу відстаней рівня $p = 0,95$ і поріг s приймається рівним цій оцінці, тобто:

$$s = d^{([np]+1)}, \quad (5)$$

де $[\bullet]$ - ціла частина числа.

Використовуючи дані вимірювань електронавантаження Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя (див. рис. 2) та запропоновану методику, проведено формування реалізацій, що належать двом режимам роботи даної організації, графіки яких показано на рис. 5. Наведені ілюстрації графіків робочих і вихідних днів підтверджують їх суттєву відмінність між собою і узгоджуються з гіпотезою стохастичної періодичності у відповідному режимі роботи організації.

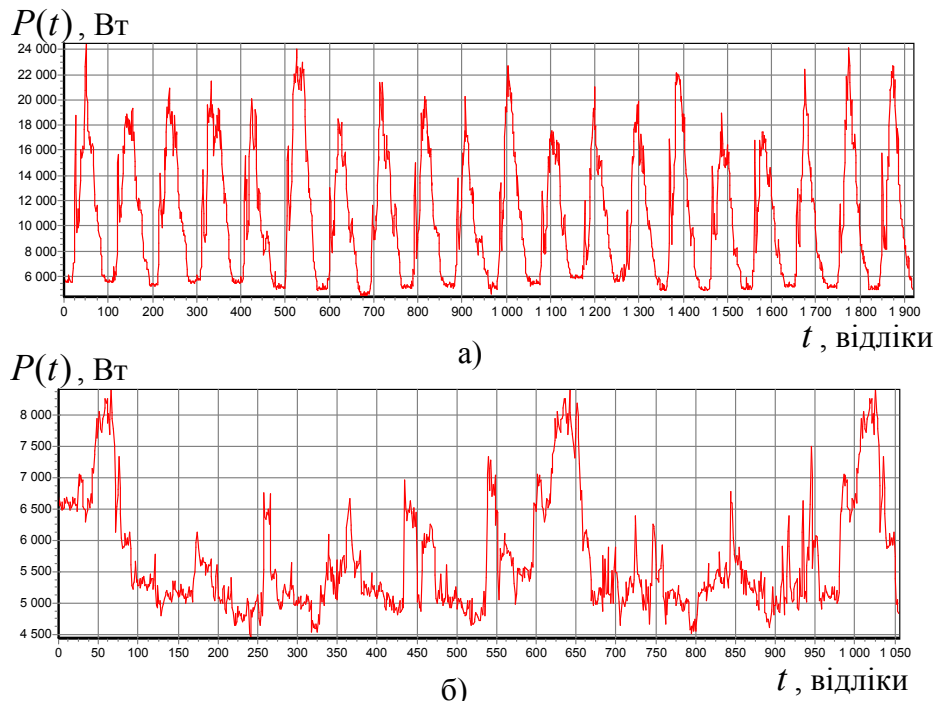


Рис. 5. Графіки реалізацій електронавантаження за робочі (а) та вихідні (б) дні березня 2007 р.

Методи статистичного аналізу сформованих матриць добових реалізацій даних вимірювань електронавантаження організації базуються на використанні

властивостей стаціонарності φ -серій (j -й стовпець матриці формує j -ту φ -серію), що дало можливість обчислити статистичні оцінки математичного сподівання та середньоквадратичного відхилення протягом доби, графіки реалізацій яких показано на рис. 6 та рис. 7 відповідно.

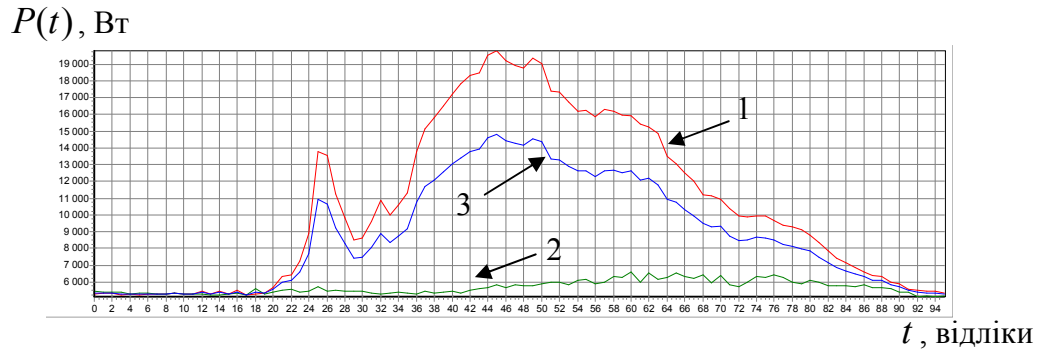


Рис. 6. Реалізація оцінки математичного сподівання: 1 – робочі дні; 2 – вихідні дні; 3 – без розділення робочих та вихідних днів.

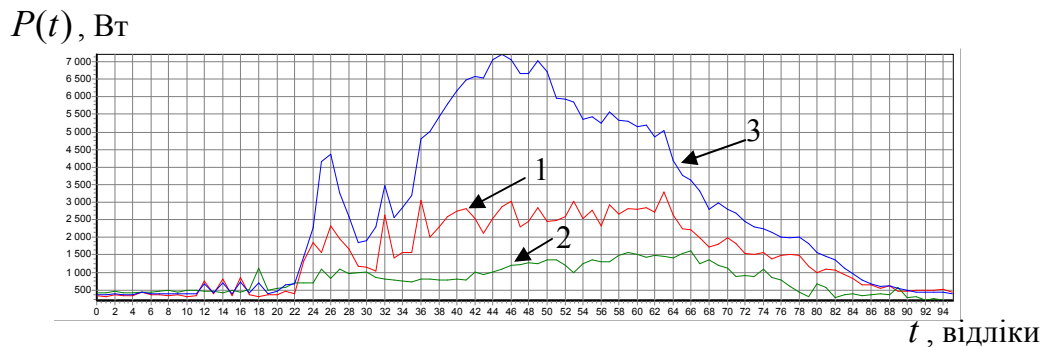


Рис. 7. Реалізація оцінки середньоквадратичного відхилення: 1 – робочі дні; 2 – вихідні дні; 3 – без розділення робочих та вихідних днів.

Як видно з графіків реалізацій статистичних оцінок математичного сподівання та дисперсії, гіпотезу про необхідність розділення робочих та вихідних днів для отримання достовірних результатів підтверджено. Проведений аналіз показує нерівномірність навантаження електромережі організації впродовж дня. Ця інформація може бути використана в її енергетичних службах для прийняття управлінських рішень по оптимізації енергонавантаження за допомогою перерозподілу потужностей навантаження або впровадження енергозберігаючих технологій.

Для статистичної перевірки твердження про некорельованість відліків електронавантаження, що використовується у моделі (1), у роботі застосовано Z -перетворення Фішера за допомогою якого підтверджено гіпотезу про те, що нормована кореляційна функція електронавантаження $r_{t,s} = 0, t \neq s$. На рис. 8 наведено приклад реалізації оцінки нормованої кореляційної функції $\hat{r}_{t,t+1}$ та показані порогові значення ($|\hat{r}_{t,t+1}| < 0,442$), за яких приймається гіпотеза про некорельованість.

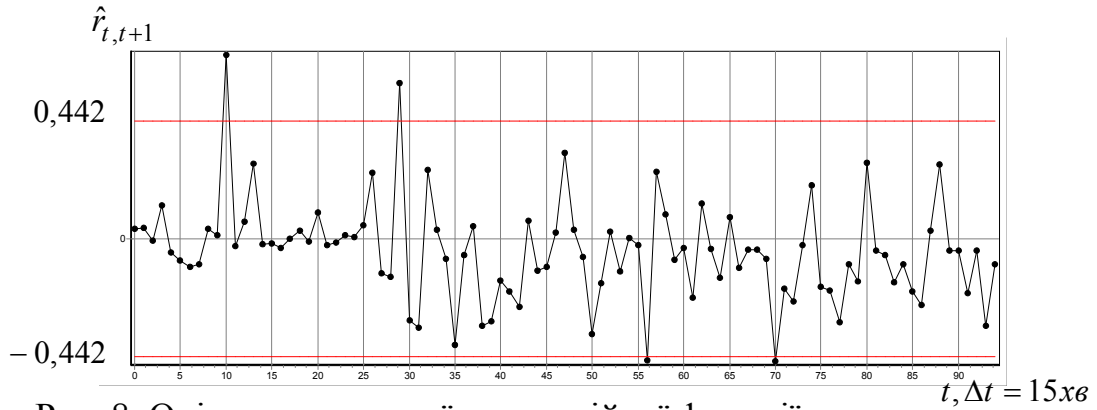


Рис. 8. Оцінка нормованої кореляційної функції електронавантаження

З метою ідентифікації розподілу електронавантаження було висунуто гіпотезу про те, що його щільність розподілу є гаусівською. Для перевірки цієї гіпотези було проведено гістограмний аналіз електронавантаження та отримано її підтвердження з використанням критерію χ^2 Пірсона (при цьому отримано значення квантиля $\chi^2_{0,95} = 7,815$, а значення статистики $\chi^2 = 0,868$). Некорельованість відліків електронавантаження та їх гаусівський розподіл дає підстави говорити про їх незалежність.

Із врахуванням наведених вище результатів, одновимірну щільність розподілу послідовності (1) можна записати у вигляді:

$$p_{\xi}(x, t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \sum_{k=1}^m \frac{1}{\sigma_{k,t}} e^{-\frac{(x-a_{k,t})^2}{2\sigma_{k,t}^2}} I_{T_k}(t), \quad t \in Z, \quad x \in [0, \infty).$$

Запропоновано метод прогнозу добового електроспоживання в залежності від температури навколишнього середовища. Використовуючи F -критерій Фішера, проведено перевірку гіпотези про наявність параболічної регресії першого порядку, яка підтвердила лінійність зв'язку між добовим електроспоживанням та температурою навколишнього повітря. Це дало змогу здійснити прогноз сумарного за добу електроспоживання за прогнозними даними середньодобової температури з використанням методу лінійної регресії.

Випадкову величину, що описує добове електроспоживання організації, позначено ξ . Тоді для заданої температури x справедливе наступне співвідношення:

$$\mathbf{M}(\xi|x) = \alpha + \beta \cdot x, \quad (6)$$

де α , β – невідомі коефіцієнти лінійної регресії, оцінки $\hat{\alpha}$ та $\hat{\beta}$ яких знаходять на основі спостережень добового електроспоживання та середньодобової температури, використовуючи метод найменших квадратів.

Оцінивши коефіцієнти лінійної регресії і врахувавши задану середньодобову температуру, оцінено математичне сподівання електровитрат за добу. Проведений регресійний аналіз даних дає можливість керівництву організації здійснювати планування добових витрат на електроспоживання в залежності від прогнозу температури.

Для визначення точності отриманих оцінок $\hat{\alpha}$ та $\hat{\beta}$ досліджуваних параметрів, побудовано довірчі інтервали. Точність прогнозу математичного сподівання добового електроспоживання для заданої температури x визначається довірчою імовірністю γ та величиною довірчого інтервалу:

$$\hat{\alpha} + \hat{\beta} \cdot x \pm h_{\gamma, N-2} \sqrt{\frac{\hat{d}_{\xi}}{N} \left(1 + \frac{(x - \bar{x})^2}{S_x^2} \right)}, \quad (7)$$

де $\hat{d}_{\xi} = \frac{1}{N-2} \sum_{n=1}^N (\xi_n - \hat{\alpha} - \hat{\beta} \cdot x_n)^2$ – оцінка дисперсії добових витрат електроенергії на основі вибірки нормально розподілених випадкових величин $(\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_N)$; (x_1, x_2, \dots, x_N) – відповідні значення температури; $\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$, $\bar{\xi} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \xi_n$, $S_x^2 = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n^2 - \bar{x}^2$, $h_{\gamma, N-2}$ – довірна границя для розподілу Стюдента з $N-2$ ступенями вільності. На рис. 9 наведена графічна ілюстрація розробленого методу прогнозування.

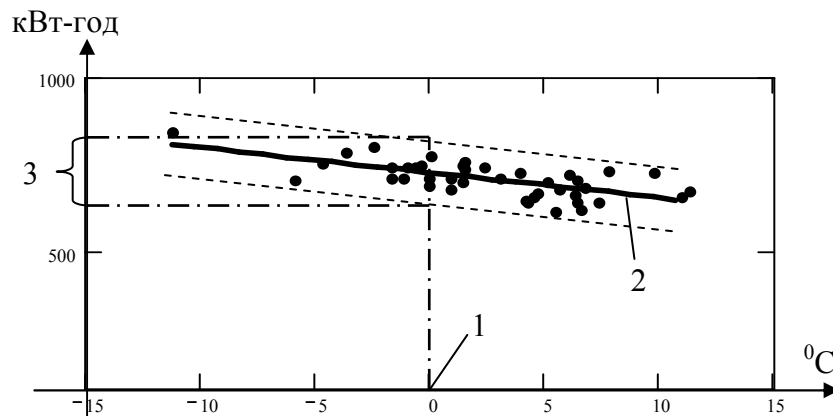


Рис. 9. Графічна ілюстрація методу прогнозування добового електроспоживання в залежності від середньодобової температури: 1-задане значення температури, 2-лінія регресії, 3 – довірчий інтервал прогнозу електроспоживання

У роботі розроблено метод комп'ютерного імітаційного моделювання процесу електронавантаження, який ґрунтується на запропонованій моделі процесу електронавантаження у вигляді кусково-періодичного дискретного білого шуму з гаусівським розподілом, що дало змогу використати відомі методи імітації таких процесів із заданими параметрами. Метод імітації використано для тестування та відлагодження програмного забезпечення апаратно-програмного комплексу моніторингу електронавантаження та перевірки адекватності моделі. На рис. 10 наведені результати комп'ютерного моделювання процесу електронавантаження, які підтвердили адекватність математичної моделі реальному процесу електронавантаження.

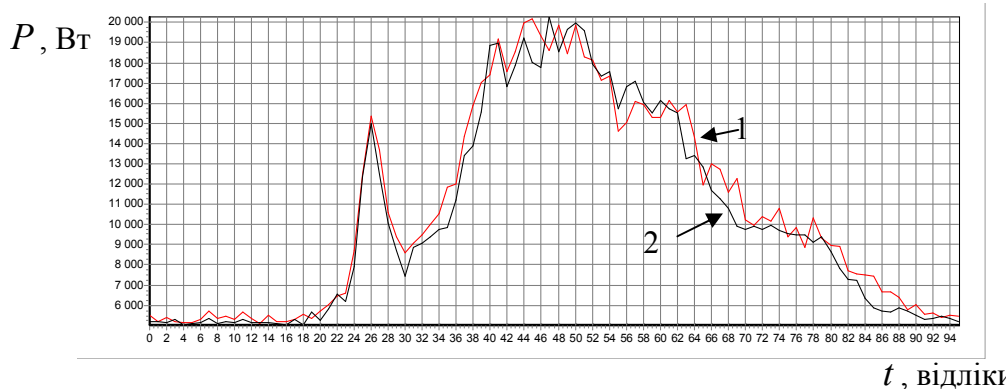


Рис. 10. Реалізація електронавантаження протягом доби:
1 – змодельований сигнал; 2 – реальні дані електронавантаження
ТНТУ ім. Івана Пулюя

Отже, в дисертації обґрунтовано математичну модель процесу електронавантаження у вигляді процесу з некорельованими значеннями, а для гаусівського розподілу – з незалежними. Така модель дає змогу використати методи статистичної обробки та імітаційного моделювання електронавантажень організацій, які є адекватними досліджуваному процесу.

У четвертому розділі розроблено проект апаратно-програмного комплексу моніторингу (рис. 11) за результатами досліджень процесу електронавантаження організації. В основі створеного технічного завдання на розробку апаратно-програмного комплексу використані результати математичного моделювання та обробки процесу електронавантаження, які наведені в попередніх трьох розділах. Основними елементами функціонування апаратно-програмного комплексу є алгоритми статистичної обробки даних вимірювань процесу електронавантажень згідно обґрунтованої моделі, створене програмне забезпечення його статистичної обробки та імітації. Визначено структуру бази даних моніторингу електронавантаження організації, що дає змогу вести збереження як його поточних характеристик, так і результатів розв'язування задач моніторингу електронавантаження.



Рис. 11. Схема апаратно-програмного комплексу моніторингу електронавантаження організації: 1 – електромережа;
2 – трансформатори струму 400/5; 3 – лічильник електроенергії;
4 – канал передачі даних; 5 – інформаційно-вимірювальний комплекс.

Структура апаратно-програмного комплексу включає в себе лічильник електроенергії СТК3-02Q2H4Mt, інформаційну мережу на базі витой пари та

інтерфейсу RS-485, персональний комп'ютер із розробленим програмним забезпеченням.

В основу структури апаратно-програмного комплексу покладено методологію створення системи з використанням серійно виготовлених модулів. Основним складовим елементом є вимірювальна підсистема на основі запрограмованого лічильника електроенергії. В даній модифікації він має змогу вимірювати активну та реактивну складові електричної енергії в одному або в двох напрямках за диференційованими у часі тарифами трифазних мереж змінного струму з промисловою частотою та проведення моніторингу основних параметрів електричної мережі організації.

Лічильник забезпечує формування бази даних результатів вимірювання, а також передачу інформації з баз даних пристроям обліку електричної енергії вищого рівня за допомогою інтерфейсних каналів. Програмне забезпечення лічильника надає можливість формувати шість графіків навантаження (два по активній енергії, чотири по реактивній). Також воно фіксує і зберігає значення максимальної та усередненої потужності за обраний період інтеграції (два – по активній енергії, чотири – по реактивній) з кожної тарифної зони (72 тарифи).

Графіки навантаження можуть бути переглянуті на індикаторі лічильника. Для роботи в складі автоматизованих систем обліку і контролю електроенергії лічильник має послідовний інтерфейсний вихід RS-485 і телеметричний імпульсний вихід.

Програмне забезпечення апаратно-програмного комплексу моніторингу виконано з використанням мови програмування C++ та компонентів середовища Borland Builder 6.0. Реляційна база даних вимірювань та обробки електронавантаження організації реалізована під управлінням системи керування базами даних Microsoft SQL Server.

У сукупності запропонований проект апаратно-програмного комплексу може бути реалізований у вигляді автоматизованої системи аналізу та прогнозу процесу електронавантаження організацій.

ВИСНОВКИ

У дисертації розв'язана актуальна науково-технічна задача розробки математичної моделі, методів обробки, прогнозування та імітації даних вимірювань електронавантаження для забезпечення побудови апаратно-програмного комплексу моніторингу електронавантаження організацій. При цьому отримані наступні результати:

1. Порівняльний аналіз відомих результатів досліджень процесів електронавантаження різних об'єктів енергетичних систем дав змогу сформулювати актуальну науково-технічну задачу математичного моделювання та методів обробки даних вимірювань електронавантаження організацій і визначити основні завдання дисертаційного дослідження.
2. Розроблено удосконалену математичну модель електронавантаження організацій у вигляді кусково-періодичного випадкового процесу з некорельованими значеннями, у якій враховано стохастичність, циклічність електронавантаження, зміну режимів роботи організації, що дало змогу

конкретизувати ймовірнісні характеристики процесу електронавантаження для кожного режиму роботи організації та зменшити обчислювальну складність методів обробки та імітації цього процесу.

3. З метою формування реалізацій процесу електронавантаження, що належать одному режиму роботи, застосовано метод кластерного аналізу з використанням Евклідової метрики відстаней між досліджуваними реалізаціями добових вимірювань, що дало змогу автоматизувати процес ідентифікації змін режимів роботи організації.
4. Використано метод непараметричної оцінки квантиля розподілу відстаней рівня $p = 0,95$ для статистичного обґрунтування емпіричного порогу зміни режимів електронавантаження організації, що дало можливість розробити метод кластеризації матриць добових реалізацій загального процесу електронавантаження організації, які належать конкретному режиму роботи.
5. Обґрунтовано метод прогнозування електроспоживання у залежності від температури навколишнього середовища на добовому часовому інтервалі з використанням моделі лінійної регресії, що дало змогу із заданою достовірністю при визначеній точності планувати витрати на електроенергію, використовуючи прогноз погоди.
6. На основі розроблених алгоритмів, програмного забезпечення комп'ютерного моделювання і статистичної обробки даних вимірювань електронавантаження, створено проект апаратно-програмного комплексу моніторингу електронавантаження, який може бути використаний у задачах короткострокового та довгострокового моніторингу електронавантаження організації.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ АВТОРОМ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ:

1. Марценко С. Структура та інформаційна параметризація бази даних електроспоживання навчального закладу / С. Марценко // Вісник Терноп. держ. техн. ун-ту. – 2008. – № 4. – С. 177-182.
2. Марценко С. В. Основні положення методики прогнозу електроспоживання навчального закладу на прикладі ТДТУ / С. В. Марценко, Н. В. Мулик, Т. Л. Щербак // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2008. – № 2. – С. 168–173.
3. Марценко С. Математична модель електронавантаження організації / С. Марценко, Н. Загородна, М. Фриз, Л. Щербак // Вісник Терноп. нац. техн. ун-ту. – 2011. – Т. 16, № 1. – С. 195-200.
4. Марценко С. В. Комп'ютеризована система для статистичної обробки даних електроживлення / С. В. Марценко // матеріали XXVI науч.-техн. конф. молодых ученых и специалистов, Киев, 10-11 янв. 2007 р. / Ин-т проблем моделир. в энергет. – К., 2007. – С. 29–30.
5. Марценко С. В. Задачі моніторингу функціонування електромережі підприємства / С. В. Марценко // матеріали XXVII наук.-техн. конф. молодих вчених і

- спеціалістів, Київ, 10-11 січ. 2008 р. / Ін-т проблем моделюв. в енерг. – К., 2008. – С. 25–26.
6. Марценко С. В. Формування бази даних вимірювань процесу електроспоживання для статистичної обробки / С. В. Марценко // матеріали XXVIII наук.-техн. конф. молодих вчених і спеціалістів, Київ, 15-16 січ. 2009 р. / Ін-т проблем моделюв. в енерг. – К., 2009. – С. 29.
 7. Марценко С. Інформаційно-вимірювальна система енергоспоживання корпусу №1 ТДТУ на основі лічильника СТК3-02Q2H4Mt для розв'язку задач моніторингу / С. Марценко, Л. Щербак // матеріали одинадцятої наук. конф., Тернопіль, 16-17 травня 2007 р. / Терноп. держ. техн. ун-т. – Т., 2007. – С. 89.
 8. Марценко С. Статистичний аналіз енергонавантаження корпусу №1 ТДТУ ім. Івана Пулюя / С. Марценко, М. Приймак // матеріали дванадцятої наук. конф., Тернопіль, 14-15 травня 2008 р. / Терноп. держ. техн. ун-т. – Т., 2008. – С. 125.
 9. Марценко С. Задача формування ансамблів однорідних статистик циклічних електронавантажень організації / С. Марценко, Л. Щербак // матеріали міжнародної наук.-техн. конф. «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій», Тернопіль, 19-21 травня 2010 р. / Терноп. нац. техн. ун-т. – Т., 2010. – С. 277-278.
 10. Щербак Л. М. Задачі і система моніторингу електроспоживання підприємства / Л. М. Щербак, О. В. Мацюк, С. В. Марценко // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2007. – № 1. – С. 37–41.
 11. Dzubin S. V., The choice and substantiation of the mathematical model of electroretinogram in the form of linear stochastic process / S. V. Dzubin, A. V. Matsiuk, S. V. Martsenko, M. V. Pryimak // International journal of computing. – 2007. – vol. 6, № 3. – P. 95–99.

АНОТАЦІЇ

Марценко С.В. Математичне моделювання та статистичні методи обробки даних вимірювань в задачах моніторингу електронавантаження – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – Математичне моделювання та обчислювальні методи (технічні науки). – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2011.

Дисертацію присвячено проблемам розробки математичної моделі електронавантаження організацій та методу прогнозу електроспоживання з використанням стохастичного підходу та з урахуванням циклічності. У дисертації побудовано нову удосконалену математичну модель процесу електронавантаження у вигляді кусково-періодичного нестационарного процесу з некорельованими значеннями (білого шуму), яка має низку переваг, зокрема, враховує циклічність та механізм формування досліджуваного сигналу. Для врахування зміни режимів роботи організацій запропоновано методику формування реалізацій, які належать одному режиму роботи, що базується на використанні методу кластерного аналізу з використанням

Евклідової метрики відстаней між добовими реалізаціями вимірювань процесу електронавантаження. При обґрунтуванні емпіричного порогу зміни режимів роботи використано метод непараметричної оцінки квантиля розподілу відстаней рівня $p = 0,95$.

Для планування добового електроспоживання запропоновано метод прогнозу з урахуванням середньодобової температури навколишнього середовища, що базується на використанні методу лінійної регресії та досліджено його точність.

Використовуючи запропоновану модель, проведено імітаційне моделювання електронавантажень. Створено проект апаратно-програмного комплексу для розв'язку задач моніторингу процесу електронавантаження організацій та проведення імітаційних експериментів.

Ключові слова: електронавантаження, електроспоживання, циклічність, кусково-періодичний процес, прогноз, регресійний аналіз, статистичні методи аналізу, імітаційне моделювання.

Марценко С.В. Математическое моделирование и статистические методы обработки данных измерений в задачах мониторинга – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – Математическое моделирование и вычислительные методы (технические науки). – Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2011.

Проведенный сравнительный анализ известных результатов исследований процессов электрических нагрузок различных объектов энергетических систем дал возможность обосновать актуальную научно-техническую задачу математического моделирования и статистических методов обработки данных измерений в задачах мониторинга электронагрузок. Результаты такого анализа дали возможность обосновать актуальность темы диссертации, определить связи диссертации с научно-исследовательскими темами, сформулировать цель, объект, предмет и методы исследований.

В диссертации разработана новая математическая модель процесса электронагрузок в виде кусочно-периодического нестационарного процесса с некоррелированными значениями (белого шума), который имеет ряд преимуществ при сравнении с известными, в том числе учитывает цикличность, механизм формирования смены режимов электронагрузок (выходные и рабочие дни). Впервые для формирования реализаций процессов электронагрузок, которые принадлежат одному режиму работы организации, использован метод кластерного анализа с применением Евклидовой метрики расстояний между исследуемыми реализациями процесса электронагрузок, что дало возможность автоматизировать процесс формирования данных измерений различных режимов работы организации. Для обоснования эмпирического порога периодичности статистически обоснован метод непараметрического оценивания квантиля распределения уровня $p = 0,95$.

Получены результаты прогноза суточного электропотребления в зависимости от среднесуточной температуры окружающей среды с использованием модели линейной регрессии, что может быть использовано при планировании затрат на электроэнергию учитывая прогноз погоды на следующий день.

Разработано алгоритмическое и программное обеспечение статистической обработки данных измерений электронагрузок организации, которое может быть использовано службами управления электропотребления для принятия решений по оптимизации работы потребителей электроэнергии. Для решения задач мониторинга электронагрузок организации разработана база данных поточных измерений электронагрузок и результатов их статистического анализа.

Разработан проект аппаратно-програмного комплекса мониторинга электронагрузок, внедрение которого повышает уровень обоснованности принятия решений о оптимизации распределения нагрузок в сети и внедрения энергосберегающих технологий.

Ключевые слова: электронагрузка, электропотребление, цикличность, кусочно-периодический процесс, прогноз, регрессионный анализ, статистические методы обработки, имитационное моделирование.

Marcenko S. V. Mathematical modeling and measurement data processing methods in problems of monitoring electricity load – Manuscript.

*Thesis for a Candidate degree in Sciences. Speciality 01.05.02 – **Mathematical modeling and computational methods** (Technical sciences). – Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University, Ternopil, 2011.*

The dissertation is concerned with arguing for the mathematical model of organizations' electricity load as well as the method of energy consumption prognosis. Stochastic approach is used and cyclic recurrence is taken into consideration. A new mathematical model of the loading process as a piece-periodic process with non-correlative value (white noise) is proposed.

Besides a range of advantages, this model includes the mechanism of generation and cyclic recurrence of the investigated signal. To take into account different organization schedules the method of homogeneous realizations development is proposed, which is based on the method of cluster analysis and Euclidean metric distances between daily implementation of the loading process. The method of non-parametric estimation of distances distribution fractile $p=0,95$ is used to study empirical discontinuity threshold.

To plan daily energy consumption a prognosis method is proposed. This method considers average daily ambient temperature and is based on the linear regression method. Accuracy of the method is studied.

Electricity loading process is simulated on the basis of this model. Hardware and software complex design is drawn up to solve the problems of monitoring electricity loading process in an organization and to carry out simulation experiments.

Key words: electricity load, energy consumption, cyclic recurrence, piece-periodic process, prognosis, regressive analysis, statistical analysis method, simulation.