

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

**ГОТОВИЧ ВОЛОДИМИР АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 519.21+620.9:519.246.8

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ І СТАТИСТИЧНЕ ОЦІНЮВАННЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК ШТАТНОГО РЕЖИМУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ  
ОРГАНІЗАЦІЙ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

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

Тернопіль – 2019

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор,  
лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки  
**Щербак Леонід Миколайович,**  
Приватний вищий навчальний заклад  
«Київський міжнародний університет»,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор,  
**Мислович Михайло Володимирович,**  
Інститут електродинаміки НАН України (м. Київ),  
завідувач відділу теоретичної електротехніки та  
діагностики електротехнічного обладнання;

кандидат технічних наук, доцент,  
**Пукас Андрій Васильович,**  
Тернопільський національний  
економічний університет,  
завідувач кафедри комп'ютерних наук.

Захист відбудеться « 4 » жовтня 2019 р. о 12<sup>00</sup> год на засіданні спеціалізованої вченої ради Д58.052.01 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя (46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, ауд. 79).

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

Автореферат розісланий « 30 » серпня 2019 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Б. Г. Шелестовський

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Дослідженням в галузі електроенергетики присвячено значну кількість наукових публікацій багатьох відомих вчених. Так, проблеми ефективності та якості електропостачання, якості електроенергії, забезпечення електромагнітної сумісності споживачів висвітлено в працях Жаркіна А. Ф., Жежеленка І. В., Кузнецова В. Г., Тесика Ю. Ф., Alexander Kusko. Проблеми надійності та ефективності функціонування електроенергетичних об'єктів і систем, надійності електропостачання, енергозбереження висвітлено в працях Кириленка О. В., Курінного Е. Г., Шидловського А. К. Розробці та застосуванню математичних моделей в електроенергетиці присвячено праці Марченка Б. Г., Праховника А. В., Приймака М. В., Сегеди М. С. Розробці інформаційних систем моніторингу, управління та діагностики присвячено дослідження Баранова Г. Л., Мисловича М. В., Стогнія Б. С. та багатьох ін.

Незважаючи на вагомий напружений наслідок поколінь дослідників, на сьогоднішній день в умовах зростання рівня споживання людством електроенергії внаслідок широкого використання електрообладнання в різноманітних сферах діяльності, актуальною була та залишається задача забезпечення коректного функціонування цього обладнання в межах передбачених умов роботи (неформально, в межах штатного режиму). Актуальність даної задачі зумовлена високим ступенем залежності багатьох процесів як виробничого характеру так і сфери життєзабезпечення суспільства від коректності функціонування електрообладнання. Вихід параметрів функціонування електрообладнання за межі передбачених умов роботи (неформально, робота в нештатному режимі) підвищує ймовірність виходу з ладу як окремих електроспоживачів, так і цілих технологічних ліній. Наслідками цього є перевитрати енергії та сировини, аварії, випуск бракованої продукції, додаткові витрати на ремонт високовартісного обладнання, моральні та матеріальні збитки тощо.

Задача забезпечення коректного функціонування електрообладнання значною мірою полягає в забезпеченні надійного електропостачання. Надійне електропостачання, в свою чергу, забезпечується контролем якості електроенергії, яка подається енергопостачальною організацією. Крім цього, забезпечення коректного функціонування мережі споживачів є неможливим без застосування спеціальних засобів моніторингу їх стану. На сьогоднішній день моніторинг стану електромереж здійснюється за допомогою автоматизованих систем під загальною назвою АСОЕ (Автоматизовані Системи Обліку Електроенергії). В основі їх роботи лежить відповідне інформаційне забезпечення: математичні моделі, алгоритми, методи та програмне забезпечення статистичної обробки накопичених даних вимірювання.

Моніторинг стану електромереж здійснюється, переважно, на рівні крупних об'єктів (енергосистем, галузей, територіальних одиниць (місто, регіон)). На рівні окремих організацій подібного роду моніторинг майже не проводиться і таким дослідженням присвячено відносно мало публікацій. Розв'язання задачі забезпечення коректного функціонування (в штатному режимі) мережі електроспоживачів організації дозволить підвищити загальну стабільність та ефективність функціонування організації.

Зважаючи на наведене вище, актуальною є задача розробки адекватних та ефективних математичних моделей як основи інформаційного забезпечення автоматизованих інформаційних систем, призначених для вирішення задач забезпечення штатного режиму електроспоживання організацій.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертацію виконано відповідно до наукових досліджень, які проводилися в ТНТУ імені Івана Пулюя на замовлення міністерства освіти і науки України у рамках науково-дослідної роботи (№ держ. реєстр. 0117U002241): «Класи інформаційних технологій в проектах “Розумне місто”» (особистий внесок здобувача – розроблено математичну модель та програмне забезпечення для вирішення задач забезпечення штатного режиму процесу електроспоживання організації як складову частину інформаційної технології).

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є математичне моделювання і статистичне оцінювання характеристик режиму електроспоживання організацій для забезпечення штатного режиму споживання електроенергії в топології мережі організації.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати задачі:

1. На основі результатів вирішення науково-технічних задач аналізу динаміки і характеристик процесів електроспоживання різних організацій обґрунтувати актуальність і завдання дослідження дисертації.

2. Розробити загальну модель процесу електроспоживання, яка б дозволила врахувати різні режими роботи топології споживачів організації і виділити енергетичні компоненти процесу.

3. На основі даних вимірювань та загальної моделі процесу електроспоживання розробити конструктивну модель процесу електроспоживання на поточних та тривалих інтервалах спостереження.

4. Обґрунтувати математичну модель електричної напруги електропостачання, яка б дозволила врахувати всі можливі варіанти спотворень характеристик напруги при вирішенні задачі контролю характеристик якості електроенергії.

5. Сформувати базу даних вимірювань процесу електроспоживання організації, обґрунтувати методи і розробити програмне забезпечення статистичного опрацювання даних вимірювань.

6. Розробити програмне забезпечення комп'ютерного моделювання реалізацій електричної напруги із спотвореннями якості електроенергії і створити базу даних для збереження результатів моделювання.

7. На основі отриманих результатів запропонувати проект апаратно-програмного комплексу моніторингу штатного режиму процесу електроспоживання організації.

**Об'єкт дослідження:** процес електроспоживання організації.

**Предмет дослідження:** математична модель, методи статистичного опрацювання реалізацій штатного режиму процесу електроспоживання організації на основі даних вимірювань.

**Методи дослідження.** При розв'язанні задач дослідження використано методи теорії випадкових процесів і математичної статистики, обчислювальної математики, цифрового опрацювання сигналів, теоретичної електротехніки, теорії вимірювань.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Вперше запропонована загальна модель процесу електроспоживання організації у вигляді багатокомпонентного випадкового процесу з моментами розладу, який формується топологією електроспоживачів кожної організації на поточних і тривалих інтервалах часу і яка, на відміну від відомих моделей, описує дії фізично обґрунтованих факторів формування процесу: трендової, періодичних і стохастичної компонент.

2. Отримав подальший розвиток метод створення моделей процесу електроспоживання організації на основі результатів вимірювань з використанням сучасних статистичних методів декомпозиції і виявлення моментів розладу даних динаміки як часових рядів.

3. Вперше обґрунтована модель електричної напруги електропостачання яка, на відміну від відомої моделі у вигляді гармонічного коливання із незмінними в часі амплітудою та частотою, враховує випадковий характер динаміки спотворень амплітуди і частоти коливання.

4. На основі обґрунтованої моделі розроблено метод комп'ютерного моделювання реалізацій електричної напруги із заданими видами спотворень амплітуди і частоти коливання при розв'язанні задачі контролю якості електроенергії.

5. Отримав подальший розвиток статистичний метод контролю штатного режиму процесу електроспоживання організації на поточних і тривалих інтервалах спостереження.

### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблене програмне забезпечення статистичного опрацювання даних вимірювань процесу електроспоживання організації та комп'ютерного моделювання реалізацій електричної напруги представляє собою єдиний комплекс алгоритмів, програм і баз даних для вирішення практичних задач по забезпеченню штатного режиму.

2. Розроблено інформаційне забезпечення і створено базу даних результатів комп'ютерного моделювання реалізацій електричної напруги для тестових випробувань вимірювального обладнання характеристик якості електроенергії.

3. Запропоновано один із можливих варіантів реалізації та алгоритму роботи мікропроцесорного пристрою оцифрування напруги, який пропонується використовувати в якості первинного вимірювального пристрою в складі апаратно-програмного комплексу.

4. Обґрунтовано і запропоновано для реалізації один із можливих варіантів структури апаратно-програмного комплексу моніторингу штатного режиму процесу електроспоживання організації з використанням типового лічильника електроенергії і розробленого програмного забезпечення.

### **Результати дисертації впроваджено в:**

а) ТзОВ Тернопільське конструкторське бюро радіозв'язку «Стріла» при розробці методів прогнозування споживання електроенергії в умовах функціонування енергоринку України;

б) навчальний процес кафедри КН ТНТУ імені Івана Пулюя.

**Особистий внесок.** Основні наукові та практичні результати, що становлять суть дисертаційної роботи, отримані автором самостійно. У працях, опублікованих в

співавторстві, автору дисертації належать: [1] – розроблено узагальнену та конструктивну моделі електричної напруги електропостачання, загальну багатокомпонентну та конструктивну дискретну моделі процесу електроспоживання; [2] – запропоновано варіант реалізації інформаційної технології моніторингу споживання енергоресурсів на прикладі газоспоживання міста; [3] – розроблено методологічну базу моделювання електричної напруги з різними зразками погіршення якості електроенергії та базу даних для збереження результатів моделювання; [4, 11, 17, 18] – запропоновано варіант апаратної частини мікропроцесорного пристрою для збору даних якості електроенергії, структуру АСКОЕ рівня організації із функціями поточного моніторингу характеристик якості електроенергії; [5, 12, 19] – обґрунтовано актуальність задачі контролю динаміки характеристик якості електроенергії; [6, 16] – обґрунтовано вибір методу “Гусениця-SSA” для статистичної обробки часових рядів електроспоживання; [7] – апробовано математичну модель процесу електроспоживання у вигляді кусково-періодичного випадкового процесу; [9] – застосовано апарат вейвлет-перетворення для оцінювання характеристик якості електроенергії; [10, 13, 14] – запропоновано проект інформаційної технології моніторингу якості електропостачання організації; [15] – обґрунтовано актуальність задачі побудови інформаційної технології комплексного моніторингу споживання енергоресурсів на базі сховищ даних.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на наступних конференціях: II, IV науково-технічна конференція “Інформаційні моделі, системи та технології” ТНТУ імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2012, 2014 рр.); XXXI, XXXII, XXXIII, XXXIV науково-технічна конференція “Моделювання” Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова (м. Київ, 2012, 2013, 2014, 2015 рр.); шоста міжнародна науково-практична конференція “Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси ПРТК-2013” НАУ (м. Київ, 2013); XI Міжнародна науково-технічна конференція “Авіа-2013” НАУ (м. Київ, 2013); XIX наукова конференція ТНТУ імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2016); IV, V Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених та студентів “Актуальні задачі сучасних технологій” ТНТУ імені Івана Пулюя (м. Тернопіль, 2015, 2016 рр.).

Результати дисертації обговорювалися на семінарах кафедри комп’ютерних наук ТНТУ імені Івана Пулюя, семінарі відділу теоретичної електротехніки (№ 12) Інституту електродинаміки НАН України, науковому тематичному семінарі № 3 «Математичне моделювання та обчислювальні методи» ТНТУ імені Івана Пулюя.

**Публікації.** Основні результати дисертації опубліковані в 19 публікаціях, зокрема: 8 статей в наукових фахових виданнях (з них: 1 стаття без співавторів [8], 1 стаття в закордонному виданні [2], 2 статті в журналах, що включені в міжнародні наукометричні бази (1 – в DOAJ та РИНЦ [6], 1 – в Index Copernicus [1])), 11 тез доповідей на конференціях.

**Структура та обсяг.** Дисертація складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 149 найменувань, містить 46 рисунків, 3 таблиці, 5 додатків. Повний обсяг дисертації складає 170 сторінок, основний зміст викладено на 118 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність, сформульовано мету, задачі, об'єкт, предмет та методи дослідження. Визначено зв'язок роботи з науково-дослідними темами університету, наведені відомості про наукову новизну і практичне значення отриманих результатів та особистий внесок автора в опубліковані за темою дисертації праці. Також висвітлено інформацію щодо апробації результатів дисертації на наукових конференціях та семінарах.

В **першому розділі** наведені результати аналітичного огляду публікацій по науковій проблематиці забезпечення штатних характеристик динаміки електроспоживання організацій, коротко окреслено основні проблеми та тенденції розвитку електроенергетики України та світу. На сьогоднішній день задачі контролю та моніторингу процесу електроспоживання (ПЕ), стану електромереж в певній мірі вирішуються за допомогою АСОЕ в межах регіонів, галузей. Однак, на рівні окремих організацій, ці задачі вирішуються не в повній мірі або ж не достатньо ефективно. В основі АСОЕ лежить інформаційне забезпечення яке, в свою чергу, розробляється на основі відповідних математичних моделей.

Електрообладнання функціонує в штатному режимі, якщо параметри його роботи знаходяться в певних передбачених стандартами межах. В розділі поняття штатного режиму узагальнено на всю електромережу організації як сукупність електрообладнання, яке використовується організацією. З метою конкретизації запропоновано наступне означення штатного режиму процесу електроспоживання організації:

***Означення 1.** Штатний режим процесу електроспоживання – це поточне і тривале функціонування всіх об'єктів та підсистем мережі споживачів електроенергії організації у рамках передбачених і прогнозованих умов роботи, за умови забезпечення електроенергією, якість якої відповідає встановленим нормам.*

Під топологією електромережі організації в роботі розуміється сукупність територіально розподілених споживачів електроенергії різної потужності, які входять в склад електромережі організації.

В якості характеристик штатного режиму електроспоживання організації пропонується вважати характеристики якості електроенергії, значення яких при штатному режимі повинні перебувати у встановлених стандартами межах, та величину сумарного електроспоживання мережі електроспоживачів організації.

В розділі задача забезпечення штатного режиму ПЕ організації розглядається як сукупність взаємопов'язаних задач контролю характеристик якості електроенергії на вході електромережі та контролю величини електроспоживання топології електромережі організації.

Основну увагу в **другому розділі** присвячено обґрунтуванню та побудові загальної і конструктивної математичних моделей ПЕ організації, розробці на основі сучасних методів декомпозиції і виявлення розладок статистичних характеристик часових рядів методу побудови конструктивної моделі процесу електроспоживання на основі даних вимірювань. Наведений конкретний приклад застосування методу.

Відомо, що ПЕ має стохастичну природу і виступає інтегральною

характеристикою організації, оскільки показує особливості та режими функціонування топології електромережі організації. В розділі наведено основні серед відомих на сьогодні математичних моделей, які застосовуються для опису ПЕ. На основі використання сучасних результатів створення моделей інформаційних сигналів запропонована загальна модель ПЕ у вигляді багатокомпонентного випадкового процесу з моментами розладу:

$$\Xi(\omega, t) = (A(t), \xi_1(\omega_1, t), \xi_2(\omega_2, t)), \quad \omega = (\omega_1, \omega_2), \quad t \in T, \quad (1)$$

яка складається із трьох компонент:  $A(t)$  – детермінованого тренду,  $\xi_1(\omega_1, t)$  – кусково-періодичного випадкового процесу і  $\xi_2(\omega_2, t)$  – кусково-стаціонарного випадкового процесу.

Трендова компонента  $A(t)$  записується у вигляді суми детермінованих функцій:

$$A(t) = \sum_{i=1}^n a_i(t) I_{\Delta T_i}(t). \quad (2)$$

Інтервали сегментації  $\{\Delta T_i, i = \overline{1, n}\}$ , на яких задаються детерміновані функції  $\{a_i(t), i = \overline{1, n}\}$ , визначаються послідовністю індикаторних функцій:

$$I_{\Delta T_i}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Delta T_i \\ 0, & t \notin \Delta T_i \end{cases}, \quad i = \overline{1, n}. \quad (3)$$

Інтервали сегментації утворюються при розбитті періоду спостереження  $T$  послідовністю миттєвих часових моментів розладу (розладки) статистичних характеристик  $\{T_i, i = \overline{0, n}\}$ :

$$\Delta T_i = \begin{cases} [T_{i-1}, T_i), & \text{при } i = \overline{1, n-1} \\ [T_{i-1}, T_i], & \text{при } i = n \end{cases}, \quad \bigcup_{i=1}^n \Delta T_i = T, \quad \Delta T_i \cap \Delta T_j = \emptyset \text{ при } i \neq j, \quad \Delta T_i \neq \emptyset. \quad (4)$$

Друга компонента моделі (1) – це кусково-періодичний випадковий процес  $\xi_1(\omega_1, t)$ , який задається у вигляді:

$$\xi_1(\omega_1, t) = \sum_{j=1}^m \zeta_j(\omega_1, t) I_{\Delta T_j}(t), \quad (5)$$

де  $\{\zeta_j(\omega_1, t), j = \overline{1, m}\}$  – послідовність періодичних випадкових процесів, у загальному випадку з різними періодами, але з фіксованим значенням періоду для кожного з них;  $\{I_{\Delta T_j}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Delta T_j \\ 0, & t \notin \Delta T_j \end{cases}, j = \overline{1, m}\}$  – послідовність індикаторних функцій.

Третя компонента моделі (1) – це кусково-стаціонарний випадковий процес  $\xi_2(\omega_2, t)$ , який задається у вигляді:

$$\xi_2(\omega_2, t) = \sum_{k=1}^q \eta_k(\omega_2, t) I_{\Delta T_k}(t), \quad (6)$$

де  $\{\eta_k(\omega_2, t), k = \overline{1, q}\}$  – послідовність стаціонарних випадкових процесів, у



загальному випадку з різними значеннями статистичних характеристик (дисперсії, математичного сподівання тощо);  $\left\{ I_{\Delta T_k}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Delta T_k \\ 0, & t \notin \Delta T_k \end{cases}, k = \overline{1, q} \right\}$  – послідовність індикаторних функцій.

Миттєві моменти розладу та їх кількість, у загальному випадку моделі (1), можуть бути різними для різних компонент. Модель (1) має значний інформаційний потенціал, який може бути реалізований з використанням сучасних методів теорій інформації, ймовірності і математичної статистики, обчислювальної математики і при практичному використанні дає можливості:

а) врахувати всі джерела формування ПЕ як детермінованого так і стохастичного характеру, сформувані всі можливі комбінації компонент, включаючи адитивні, мультиплікативні, адитивно-мультиплікативні і часткові випадки дії окремих компонент;

б) класифікувати джерела формування ПЕ на фізично обґрунтовані групи, а саме:

1) трендову компоненту, яка є найбільш енергетично інтенсивною і формується основними джерелами споживання електроенергії, що описуються фундаментальними фізичними законами (закони Ома, Кірхгофа тощо);

2) стохастично-періодичну компоненту, яка формується джерелами з циклічним (періодичним) характером функціонування (двигуни, генератори, турбіни, механізми з електричним приводом тощо);

3) стохастичну стаціонарну компоненту, яка формується інтегральною дією значної кількості джерел, що відносяться до джерел стохастичної природи (наприклад, випадкові моменти включення/виключення споживачів та випадкові тривалості сеансів їх роботи);

в) описувати процеси електроспоживання як на поточних (доба, тиждень, місяць) так і на тривалих (квартал, рік) інтервалах часу використовуючи моменти зміни динаміки (статистичних характеристик) процесу – моменти розладу, які відображають дію фізично обґрунтованих механізмів їх зміни;

г) використовувати при статистичному опрацюванні даних вимірювання ПЕ сучасні методи декомпозиції (розкладу) і виявлення часових моментів розладу.

Конструктивна модель ПЕ організації, як частковий випадок моделі (1), описується нестационарним випадковим процесом з розладкою у вигляді:

$$\gamma(\omega, t) = \sum_{i=1}^n [a_i(t) + b_i(t) + \eta_i(\omega, t)] I_{\Delta T_i}(t), \quad \omega \in \Omega, t \in T, \quad (7)$$

де  $\{a_i(t), i = \overline{1, n}\}$  – послідовність детермінованих функцій тренду  $A(t)$  згідно (2);

$\{b_i(t), i = \overline{1, n}\}$  – послідовність детермінованих періодичних складових з різними періодами коливання (доба, тиждень тощо), як часткового випадку компоненти  $\xi_1(\omega_1, t)$  загальної моделі ПЕ організації згідно (5);  $\{\eta_i(\omega, t), i = \overline{1, n}\}$  – послідовність стаціонарних випадкових процесів компоненти, як часткового випадку компоненти

$\xi_2(\omega_2, t)$  загальної моделі ПЕ організації згідно (6);  $\{I_{\Delta T_i}(t), i = \overline{1, n}\}$  – послідовність індикаторних функцій виду (3) на відповідних інтервалах сегментації ПЕ організації.

У розділі наведено обґрунтування застосування конструктивної моделі ПЕ організації в різних предметних областях, наприклад, при дослідженнях процесу газоспоживання, кардіосигналів, фінансових процесів тощо.

Реалізацією випадкового процесу (7) є часовий ряд вигляду:

$$E(t) = \sum_{i=1}^n [a_i(t) + b_i(t) + n_i(t)] I_{\Delta T_i}(t), \quad t \in T. \quad (8)$$

Фізично обґрунтованою для конструктивної моделі ПЕ організації є синхронність (одночасність) моментів розладу для всіх компонент процесу.

В розділі для побудови конструктивної моделі на основі даних вимірювань ПЕ організації запропонований статистичний метод, послідовність етапів застосування якого полягає в наступному.

На *першому етапі* обґрунтовується конкретний метод декомпозиції загального часового ряду даних вимірювань ПЕ організації на три часових ряди, які відповідають компонентам: трендовій, періодичній і стохастичній.

На *другому етапі* обґрунтовується конкретний метод виявлення миттєвих моментів розладу (зміни) динаміки всіх трьох компонент загального часового ряду і формується послідовність їх моментів розладу.

На *третьому етапі* відбувається сегментація інтервалу спостереження  $[0, T]$  тобто, розбиття моментами розладу динаміки на ділянки часових рядів компонент процесу – тренду, періодичної і стохастичної компонент.

На *четвертому етапі* по отриманим часовим рядам в межах кожного сегменту відбувається розробка моделі кожної із компонент з метою формування загальної математичної моделі ПЕ організації.

В роботі обґрунтовано використання для декомпозиції часового ряду ПЕ методу “Гусениця-SSA”, та в якості методу сегментації – методу PELT (англ. The pruned exact linear time) – т. зв. “метод оптимального поділу за обрізаний точний лінійний час”. Результати наведено на рис 1. та рис 2.

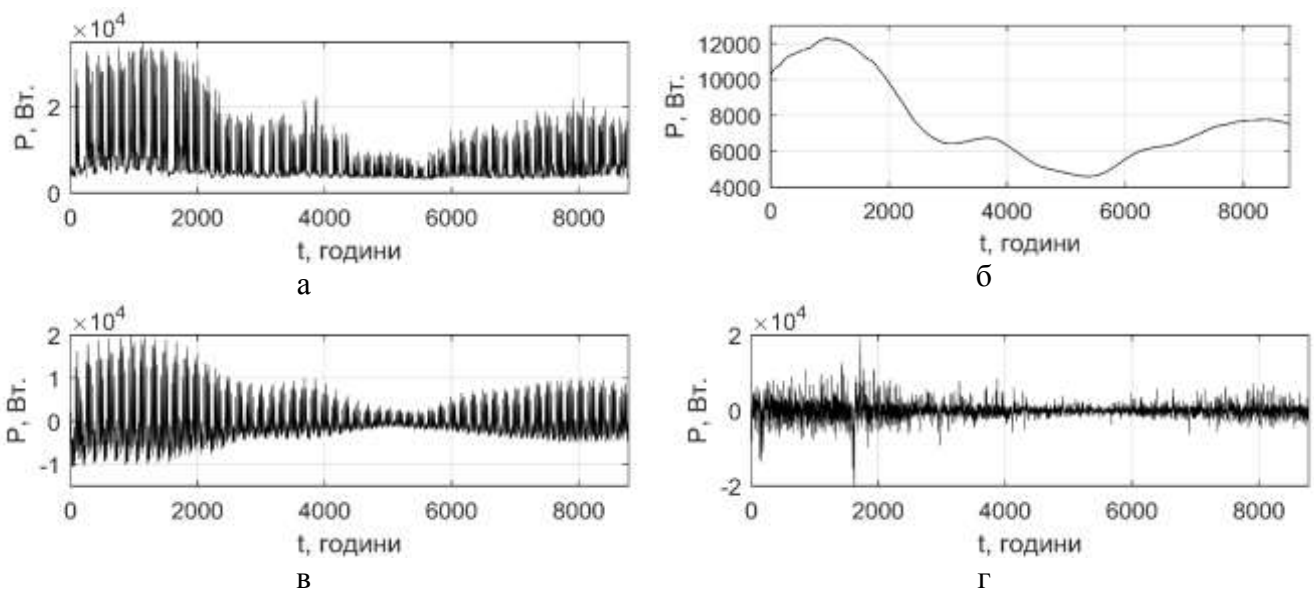


Рисунок 1 – Результати розкладу на компоненти реалізації ПЕ організації з використанням методу “Гусениця-SSA”: а – реалізація ПЕ; б – трендова компонента; в – сума коливних компонент; г – компонента стохастичного характеру

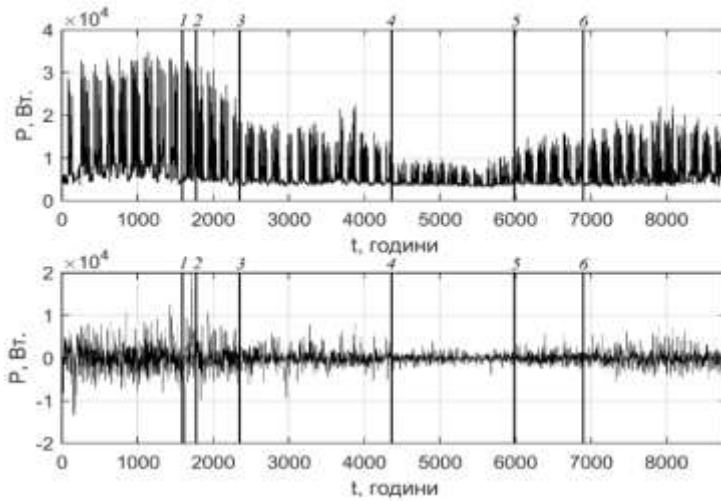


Рисунок 2 – Поділ на сегменти реалізацій ПЕ та стохастичної компоненти ПЕ

Наведемо приклад побудови моделей компонент вихідного ПЕ на першому сегменті для  $t \in [1, 1591]$  год.:

а) тренд, апроксимований поліномом третього порядку (рис. 3):  
 $a_1(t) = -9,506 * 10^{-7} t^3 + 3,0023 * 10^{-4} t^2 + 2,4241 * t + 1,0448$ ;

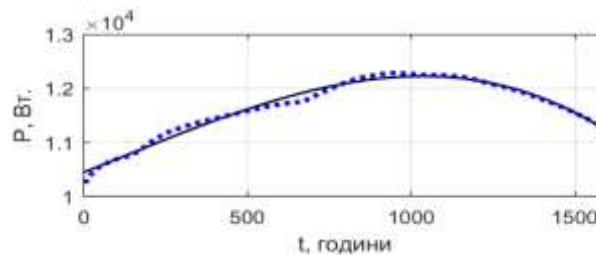


Рисунок 3 – Тренд, апроксимований поліномом

б) детерміновані компоненти коливного характеру (рис. 4):

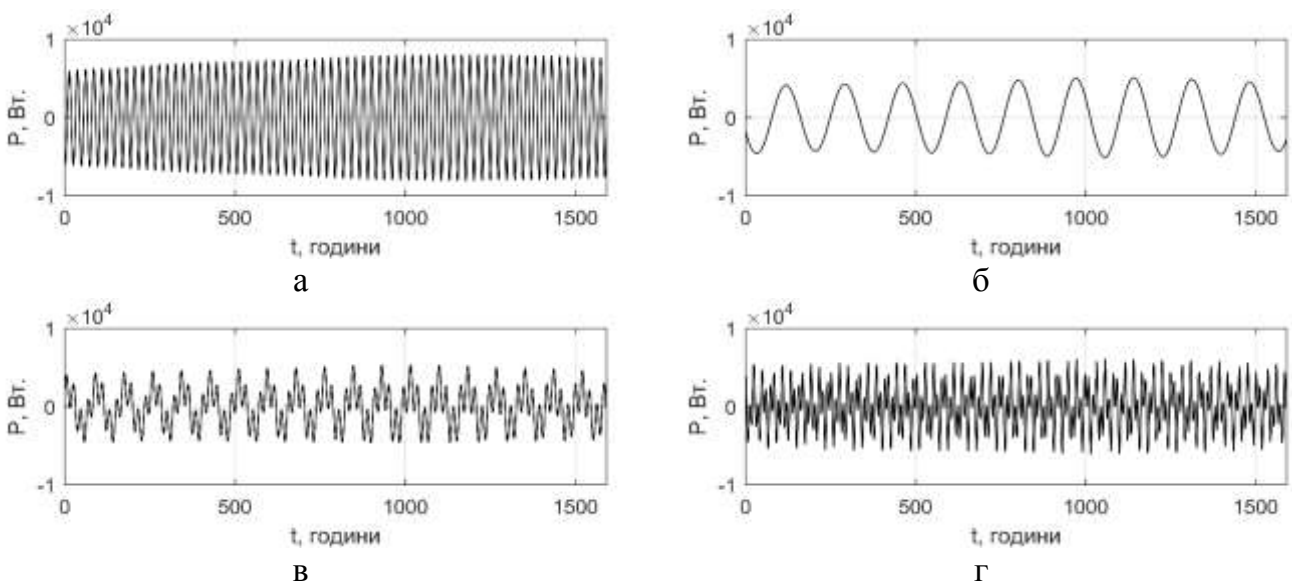


Рисунок 4 – Детерміновані компоненти коливного характеру: а – амплітудно модульована компонента з періодом коливання в одну добу; б – амплітудно модульована компонента з періодом коливання в один тиждень; в-г – амплітудно модульовані компоненти з різним але постійними для кожної із компонент періодом коливання

в) стохастична компонента – випадковий стаціонарний процес  $n_i(t)$  з нормальним розподілом і математичним сподіванням, яке є близьким до нуля (рис. 5).

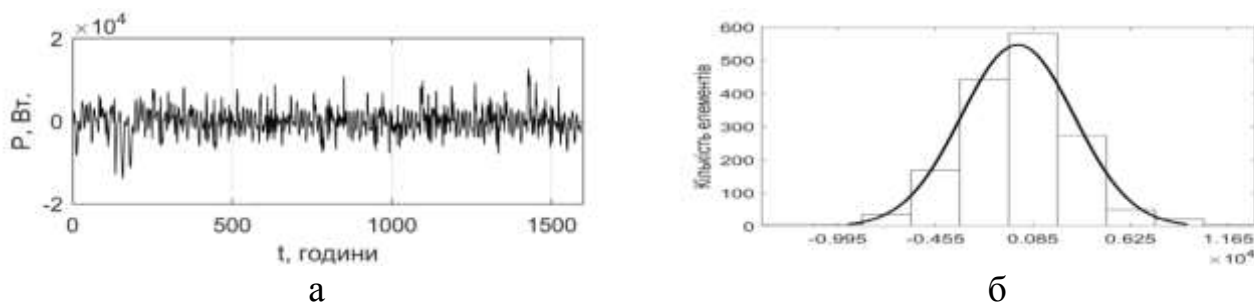


Рисунок 5 – Стохастична компонента ПЕ організації на першому сегменті однорідності: а – реалізація стохастичної компоненти; б – оцінка емпіричної щільності розподілу компоненти

Отримані в результаті застосування статистичних методів “Гусениця” та PELT результати дозволяють створити загальну математичну модель процесу електроспоживання на основі даних вимірювань на річному інтервалі спостереження:

$$E(t) = \sum_{i=1}^n [a_i(t) + b_i(t) + n_i(t)] I_{\Delta T_i}(t), \quad t \in T, \quad (9)$$

де  $\{a_i(t), i = \overline{1, n}\}$  – послідовність детермінованих компонент тренду, які задаються

поліномами;  $\left\{ b_i(t) = \sum_{p=1}^k l_{i,p}(t), p = \overline{1, k}, i = \overline{1, n} \right\}$  – послідовність амплітудно

модульованих детермінованих періодичних компонент із різним, але постійним для кожної із них, періодом коливання;  $\{n_i(t), i = \overline{1, n}\}$  – послідовність стаціонарних стохастичних компонент з нормальним розподілом і різним, але постійним для кожного із них, значенням математичного сподівання;  $I_{\Delta T_i}(t)$  – індикаторна функція, яка задовольняє умовам (3). Для конкретного випадку ПЕ значення  $k = 5$  і  $n = 7$ .

**Третій розділ** присвячений створенню інформаційного забезпечення моделювання напруги електропостачання з різними значеннями характеристик якості електроенергії.

Розробка засобів контролю та моніторингу штатного режиму ПЕ взагалі та якості електроенергії зокрема пов’язана зі створенням відповідного програмного забезпечення. При цьому, з метою відлагодження апаратно-програмних засобів розробники, як правило, не мають можливості використання необхідного об’єму статистичних даних, зібраних із реальних мереж електропостачання. В тому числі, практично неможливо зібрати всі зразки спотворення якості електроенергії. В той же час, сучасний рівень розвитку науки і техніки дає змогу змоделювати необхідні зразки статистики (реалізацій електричних сигналів напруги і струму). Дані зразки повинні містити приклади спотворення форми синусоїди сигналу (погіршення якості електроенергії) з різним числовим значенням характеристик якості електроенергії.

Наведемо згідно нормативних документів означення якості електроенергії.

**Означення 2.** Якість електроенергії – це ступінь відповідності характеристик електроенергії в даній точці електричної системи сукупності нормованих показників якості електроенергії.

Погіршення якості електроенергії полягає у спотвореннях амплітуди і частоти електричної напруги, яка описується гармонічним коливанням. У відомій математичній моделі електричної напруги

$$U(t) = U_m \cos(2\pi f_0 t + \theta_0), \quad t \in T, \quad (10)$$

де  $U_m$  – амплітуда,  $f_0$  – частота,  $\theta_0$  – початкова фаза, не відображені спотворення характеристик електричної напруги а саме, амплітуди і частоти і, по суті, вона є ідеалізованою моделлю.

На основі аналізу фізичної моделі, використовуючи сучасний підхід та на основі застосування теорії випадкових процесів запропонована наступна математична модель електричної напруги на вході електромережі організації:

$$u(\omega, t) = U(\omega_1, t) \cos \Psi(\omega_2, t), \quad t \in T, \quad \omega_1 \in \Omega_1, \quad \omega_2 \in \Omega_2, \quad \omega = (\omega_1, \omega_2), \quad \Omega = (\Omega_1, \Omega_2), \quad (11)$$

де  $u(\omega, t)$  – випадковий процес напруги;  $U(\omega_1, t)$  – випадковий процес амплітудних значень напруги;  $\Psi(\omega_2, t)$  – випадковий процес загальної частоти напруги.

Даний вираз – це модель випадкової гармонічної напруги електроенергії з одночасною амплітудною і кутовою модуляцією випадковими, в більшості випадків незалежними процесами  $U(\omega_1, t)$  та  $\Psi(\omega_2, t)$ . Більш конструктивною є модель, як частковий випадок моделі (11) у вигляді:

$$u(\omega, t) = U_m \left( 1 + \sum_{i=1}^n \xi_{1i}(\omega_1, t) I_{\Delta T_i}(t) \right) \cdot \cos \left[ 2\pi t \left( f_0 + \sum_{j=1}^m \xi_{2j}(\omega_2, t) I_{\Delta T_j}(t) \right) \right], \quad (12)$$

$$\Delta T_i, \Delta T_j \subseteq T, \quad t \in T, \quad \omega \in (\omega_1, \omega_2), \quad \omega_1 \in \Omega, \quad \omega_2 \in \Omega,$$

де  $\{\xi_{1i}(\omega_1, t), i = \overline{1, n}\}$  – послідовність випадкових процесів імпульсного типу, які описують випадкові спотворення амплітуди на інтервалі часу спостереження  $[0, T]$ , дія спотворення має місце на часовому інтервалі  $\Delta T_i$ , визначеному індикаторною

функцією  $I_{\Delta T_i}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Delta T_i \\ 0, & t \notin \Delta T_i \end{cases}$ ;  $\{\xi_{2j}(\omega_2, t), j = \overline{1, m}\}$  – послідовність випадкових

процесів, які описують випадкові спотворення частоти на інтервалі часу спостереження  $[0, T]$  і кожен з яких представляє собою повільно змінний нестационарний процес, дія спотворення має місце на часовому інтервалі  $\Delta T_j$ ,

визначеному індикаторною функцією  $I_{\Delta T_j}(t) = \begin{cases} 1, & t \in \Delta T_j \\ 0, & t \notin \Delta T_j \end{cases}$ .

Модель (11) дає можливість проаналізувати всі можливі як амплітудні так і частотні спотворення напруги електроенергії з врахуванням всіх практичних випадків. Саме модель (11) повністю реалізує фізичну модель як штатних так і нештатних режимів подачі вхідної напруги електроенергії. На рис. 6. наведено типовий найпростіший приклад реалізації електричної напруги. Дія випадкових

процесів, які визначають амплітуду, має місце на інтервалах часу  $\Delta T_i$ .

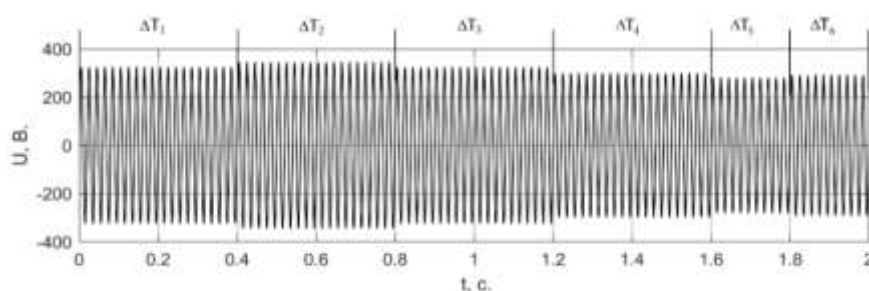


Рисунок 6 – Приклад реалізації електричної напруги із змінами амплітуди

В розділі наведено один із можливих варіантів методики моделювання засобами середовища Simulink пакету MATLAB реалізацій сигналів електричної напруги із різними зразками спотворення форми кривої сигналу (схема на рис. 7).

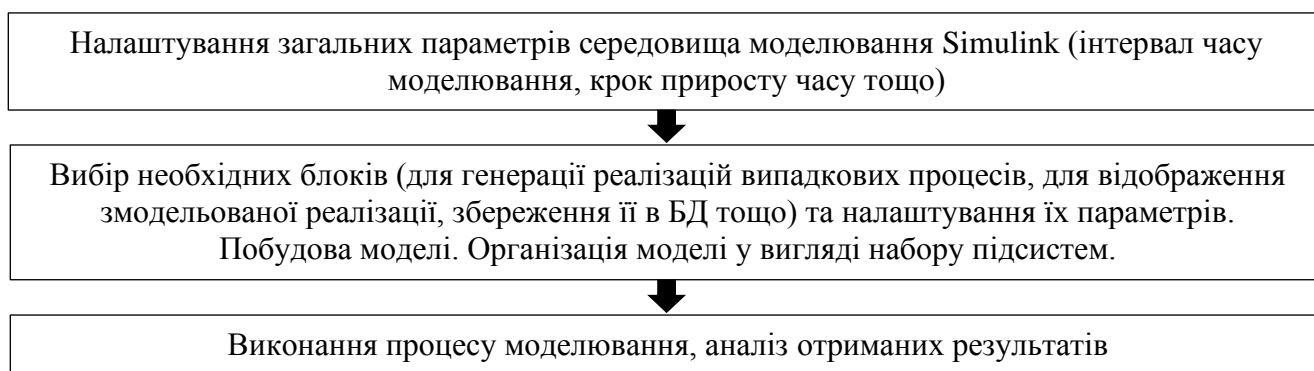


Рисунок 7 – Методика моделювання реалізацій електричної напруги з різними спотвореннями якості електроенергії на основі використання середовища Simulink

Моделювання пропонується проводити на основі використання двох типів спотворення форми кривої сигналу електричної напруги: штатного (характеристики якості знаходяться в гранично допустимих межах, наявне незначне або невелике відхилення форми кривої електричної напруги від ідеальної) і нештатного (принаймні одна із характеристик якості виходить за гранично допустимі межі, що помітним чином візуально відображується на формі кривої електричної напруги). Зразки типових моделей середовища Simulink наведено на рис. 8.

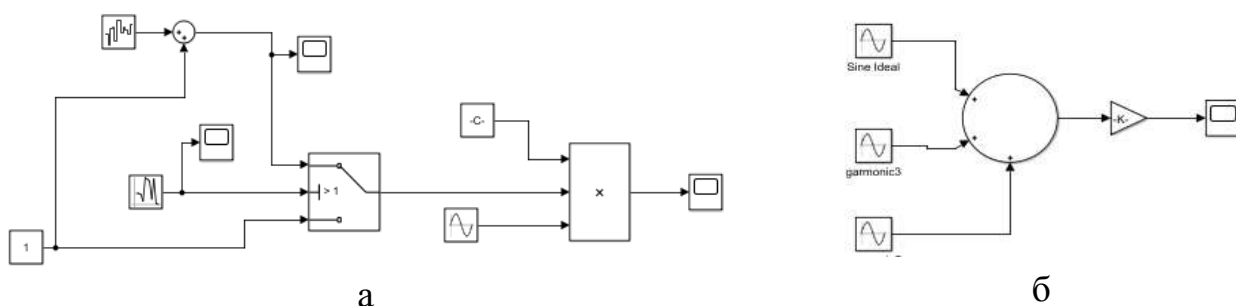


Рисунок 8 – Зразки пропорованих моделей середовища Simulink:  
а – для моделювання синусоїд із зміною амплітуди;  
б – для моделювання синусоїди, яка складається із трьох гармонік

Типові результати моделювання наведено на рис. 9.

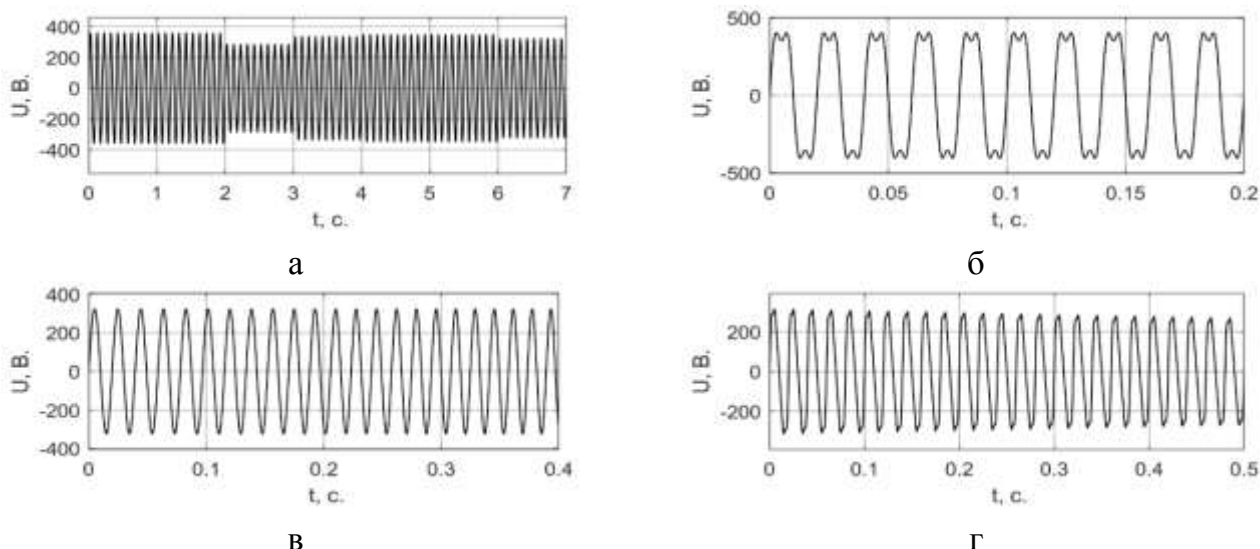


Рисунок 9 – Зразки отриманих в результаті моделювання реалізацій електричної напруги: а – із зміною амплітуди; б – перша та третя гармоніки; в – лінійно зростаюча частота сигналу; г – лінійно спадаюча амплітуда сигналу та гармоніки

Оскільки в процесі моделювання реалізацій електричної напруги параметри використаних блоків середовища Simulink є заданими, то характеристики якості електроенергії таких реалізацій визначаються однозначно. Виходячи з цього, отриману базу реалізацій вхідної електроенергії можна використати в якості типових прикладів при тестових випробуваннях вимірювального електрообладнання характеристик якості електроенергії.

В роботі пропонується застосування реляційної бази даних під управлінням СУБД з відкритим програмним кодом MySQL для збереження змодельованих реалізацій електричної напруги. У розділі розроблено та наведено структуру найпростішої бази даних. В склад даної бази даних входять декілька таблиць, структуру та призначення полів основних з яких представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Структура таблиць бази даних для збереження результатів моделювання зразків електричної напруги

Таблиця в БД	Поле	Тип поля	Призначення
SampleDescriptions	ID	Int	Первинний ключ
SampleDescriptions	Description	Varchar	Текстовий опис реалізацій напруги
SampleDescriptions	Date	Datetime	Відмітка про дату та час моделювання реалізації
Samples	ID	Int	Первинний ключ
Samples	SampleID	Int	Зовнішній ключ
Samples	Time	Double	Відліки часу
Samples	Value	Double	Значення напруги
PQIndicators	ID	Int	Первинний ключ
PQIndicators	SampleID	Int	Зовнішній ключ
PQIndicators	PQTypeID	Int	Тип характеристики якості електроенергії
PQIndicators	Value	Double	Значення характеристики якості

Імпорт даних з робочого простору MATLAB в базу даних MySQL реалізовано засобами MATLAB Database Toolbox.

**Четвертий розділ** присвячений завершальному етапу дослідження – аналізу відомих систем моніторингу ПЕ рівня організації та розробці, з метою верифікації отриманих в попередніх розділах результатів, структури АПК моніторингу штатного режиму електроспоживання рівня організації з функцією контролю характеристик якості електроенергії (рис. 10).



Рисунок 10 – Структурна схема АПК для моніторингу штатного режиму електроспоживання організації з контролем характеристик якості електропостачання

АПК моніторингу штатного режиму ПЕ організації повинен вирішувати дві взаємопов'язані задачі:

1. Контролювати величину електроспоживання топології електромережі;
2. Контролювати характеристики якості електроенергії на вході електромережі.

АПК повинна підвищити ефективність роботи відповідної диспетчерської служби організації. Запропонований АПК передбачається використовувати в якості засобу, який працює на організацію. Також за необхідності, він може використовуватися як модуль в складі АСКОЕ вищого рівня (міста, району). В склад запропонованого АПК входять:

- модулі, які реалізують функції вимірювання (вимірювальні модулі збору даних з електромережі) та передачі інформації (програма-драйвер) на вищі рівні ІС з використанням стандартних протоколів (RS-485, USB, HTTP, PQDIF, COMTRADE тощо). Збір даних може здійснюватися стаціонарними пристроями а також мобільними пристроями, які можна підключати до різних точок досліджуваної електромережі;
- модулі, які реалізують функції зберігання інформації. Сюди належить база даних (БД), в якій зберігається отримана від пристроїв збору даних інформація та інформація, отримана від підсистеми операційної інформації (звіти, результати статистичної обробки тощо);
- модулі, які реалізують функції операційної інформації. Сюди належить програмне забезпечення встановлене, як правило, на окремому комп'ютері (сервері),



яке виконує функції опрацювання накопиченої в БД інформації на основі відповідного інформаційного забезпечення з видачею результатів опрацювання у зручній для користувача формі (графіки, діаграми) та можливістю збереження цих результатів у БД.

*Інформаційне забезпечення АПК.* В складі АПК використано наступні алгоритми, реалізовані в MATLAB:

- алгоритм PELT сегментації часового ряду стохастичного характеру, отриманого в результаті застосування “Гусениці-SSA”;
- алгоритми статистичної обробки реалізацій, що відповідають окремим сегментам ПЕ (знаходження оцінок емпіричної щільності розподілу ряду стохастичних залишків, визначення аналітичного вигляду моделей компонент ПЕ на кожному із сегментів);
- алгоритми моделювання реалізацій електричної напруги із різними типовими зразками спотворення якості електроенергії.

В складі АПК використано комплекс програмного забезпечення (ПЗ), зокрема:

- ПЗ для опитування цифрових лічильників та пристроїв моніторингу якості електроенергії (т. зв. програми-драйвери);
- ПЗ моделювання реалізацій електричної напруги із типовими зразками спотворення якості електроенергії в MATLAB;
- ПЗ реалізації алгоритму “Гусениця-SSA”;
- ПЗ статистичної обробки даних по електроспоживанню, реалізоване в MATLAB.

В складі АПК використано наступні бази даних:

- БД з інформацією про миттєві значення величини електроспоживання, отриманої від електролічильників. В цю ж БД повинні зберігатися обчислені статистичні характеристики ПЕ на окремих сегментах, звіти тощо;
- БД з інформацією про якість електроенергії від пристроїв моніторингу якості на вході електромережі організації;
- БД змодельованих реалізацій електричної напруги із різними типовими зразками спотворення якості електроенергії для тестування засобів вимірювальної техніки.

В якості системи управління базами даних (СУБД) пропонується використання систем з відкритим вихідним кодом, наприклад, MySQL. В розділі наведено типову структуру пропонованих БД.

*Апаратне забезпечення АПК.* В розділі наведено один із можливих варіантів реалізації та алгоритму роботи мікропроцесорного пристрою оцифрування напруги, розробленого на базі мікроконтролера STM32F103VG та швидкодіючого АЦП AD7980. Даний пристрій пропонується використовувати в якості первинного вимірювального пристрою для оцифрування напруги в складі АПК.

## **ВИСНОВКИ**

У дисертації розв’язано актуальну наукову задачу математичного моделювання і статистичного оцінювання характеристик режиму електроспоживання організацій для забезпечення штатного режиму споживання

електроенергії в топології електромережі організації, що має істотне значення для побудови та вдосконалення математичних моделей та методів статистичної обробки даних вимірювань як основи автоматизованих систем із функцією забезпечення штатного режиму електроспоживання організацій. Отримано наступні результати:

1. На основі аналізу стану та тенденцій розвитку методів забезпечення характеристик динаміки електроспоживання організацій з різною топологією мережі електроспоживання обґрунтована актуальність наукової задачі і визначені завдання для її розв'язання.

2. Запропонована та обґрунтована загальна багатокомпонентна стохастична модель з моментами розладу процесу електроспоживання, яка дозволила врахувати різні режими роботи топології електромережі і виділити фізично обґрунтовані трендову, періодичні і стохастичну компоненти процесу.

3. Отримав подальший розвиток метод створення моделей процесу електроспоживання організації на основі даних вимірювань з використанням сучасних методів декомпозиції і виявлення моментів розладу динаміки часових рядів, що дало можливість створювати конструктивні моделі процесу електроспоживання організації на поточних і тривалих інтервалах спостереження.

4. Запропонована і обґрунтована стохастична модель електричної напруги електропостачання з динамікою спотворень в часі амплітуди і частоти, що дало можливість врахувати різні варіанти спотворень характеристик напруги при розв'язанні задачі контролю якості електроенергії.

5. На основі розроблених моделей створено програмне забезпечення моніторингу штатного режиму процесу електроспоживання організації, сформовано базу даних вимірювань процесу електроспоживання.

6. Розроблено інформаційне забезпечення комп'ютерного моделювання реалізацій електричної напруги із спотвореннями якості електроенергії і сформовано базу даних реалізацій, яка може бути використана як тестова статистика для випробувань вимірювального обладнання характеристик якості електроенергії.

7. З метою верифікації результатів моделювання та підвищення ефективності вирішення задач моніторингу штатного режиму процесу електроспоживання організації запропоновано варіант відповідного апаратно-програмного комплексу.

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

### **Праці, в яких опубліковано основні наукові результати**

1. Gotovych, V., Nazarevych, O., Shcherbak, L. Mathematical modeling of the regular-mode electric power supply and electric power consumption processes of the organization. *Scientific Journal of the TNTU*. № 3 (91) 2018. Pp. 134–142.
2. Nazarevych, O., Gotovych, V., Shymchuk, G. Information Technology for Monitoring of Municipal Gas Consumption, Based on Additive Model and Correlated for Weather Factors. *Journal of Information and Computing Science*. England, UK. 2016. Pp. 180–187.
3. Волошко А. В., Готович В. А., Назаревич О. Б. Основи створення бази реалізацій сигналів для дослідження характеристик якості електроенергії. *Моделювання та інформаційні технології*. Збірник наукових праць Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2016. В. 77. С. 33–40.

4. Готович В. А., Марценко С. В., Щербак Л. М. Створення мобільного апаратно-програмного пристрою моніторингу характеристик якості електроенергії. Збірник наукових праць Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2014. В. 70. С. 98–105.
5. Готович В. А., Марценко С. В., Щербак Т. Л. Задача контролю динаміки характеристик якості електроенергії. *Моделювання та інформаційні технології*. Збірник наукових праць Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова 2013. В. 70. С. 109–113.
6. Готович В. А., Назаревич О. Б. Застосування методу «Гусениця-SSA» для аналізу річного часового ряду електронавантаження організації. *Вісник НТУУ «КПІ». Інформатика, управління та обчислювальна техніка*: Зб. наук. пр. К.: "Век+". 2015. № 63. С. 123–129.
7. Готович В. А., Назаревич О. Б., Шимчук Г. В., Щербак Т. Л. Статистичний аналіз процесу газоспоживання міста на річному інтервалі спостереження. *Моделювання та інформаційні технології*. Збірник наукових праць. Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2016. В. 76. С. 44–51.
8. Готович В. А. Статистичний аналіз процесу електроспоживання організації на тривалих інтервалах спостереження. *Моделювання та інформаційні технології*. Збірник наукових праць. Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова. 2018. В. 82. С. 27–33.

#### **Праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації**

9. Готович В. А., Марценко С. В. Застосування вейвлет-перетворення для оцінювання характеристик якості електроенергії. *Актуальні задачі сучасних технологій*: збірник тез доповідей IV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, 25-26 листопада 2015 року. Т. II, 2015. С. 14–15.
10. Готович В. А., Марценко С. В. Інформаційно-вимірювальна система дослідження якості електроенергії. Матеріали II науково-технічної конференції. *Інформаційні моделі, системи та технології*. ТНТУ ім. І. Пулюя 25 квітня 2012 р. Тернопіль. С. 28.
11. Готович В. А., Марценко С. В. Мобільний апаратно-програмний пристрій моніторингу характеристик якості електроенергії. Матеріали IV науково-технічної конференції. *Інформаційні моделі, системи та технології*. ТНТУ ім. І. Пулюя 15-16 травня 2014 р. Тернопіль. С. 19.
12. Готович В. А., Марценко С. В. Статистична оцінка характеристик якості електричної енергії. *Моделювання*: збірник тез доповідей XXXI науково-технічної конференції. Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова, 11-12 січня 2012 р. К.: 2012. С. 31.
13. Готович В. А., Марценко С. В. Створення інформаційної системи поточного моніторингу якості електричної напруги на базі мікроконтролера. *Моделювання*: збірник тез доповідей XXXII науково-технічної конференції. Ін-т. проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова, 9-10 січня 2013 р. К.: 2013. С. 10.
14. Готович В. А., Назаревич О. Б. Інформаційна технологія моніторингу якості електропостачання організації. Матеріали XIX наукової конференції ТНТУ ім. І. Пулюя 18-19 травня 2016. Тернопіль. С. 83–84.

15. Готович В. А., Назаревич О. Б., Шимчук Г. В. Комплексний моніторинг споживання енергоресурсів міста з використанням технології OLAP. *Актуальні задачі сучасних технологій*: збірник тез доповідей V Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів, 17-18 листопада 2016 року. Т. II. 2016. С. 26.
16. Готович В. А., Щербак Л. М. Застосування методу “Гусениця-SSA” для аналізу часового ряду електронавантаження. *Моделювання*: збірник тез доповідей XXXIII науково-технічної конференції. Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова, 15-16 січня 2015 р. К.: 2015. С. 20.
17. Готович В. А., Щербак Л. М. Прецезійний мікропроцесорний пристрій оцифрування напруги. *Моделювання*: збірник тез доповідей XXXIII науково-технічної конференції. Ін-т проблем моделювання в енергетиці ім. Г. Є. Пухова, 15-16 січня 2014 р. К.: 2014. С. 22.
18. Орнатський Д. П., Щербак Л. М., Готович В. А., Кармазін О. В. Структура автономного засобу контролю характеристик якості електроспоживання. Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції. *Авіа-2013*. НАУ 21-23 травня 2013 р. Т. I. К.: 2013. С. 1.57–1.60.
19. Щербак Л. М., Готович В. А., Марценко С. В. Поточний моніторинг характеристик якості електроенергії. Збірка тез Шостої Міжнародної науково-практичної конференції «*Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2013)*» (27-29 травня 2013 р., Київ). К.: НАУ. 2013. С. 47–48.

## АНОТАЦІЯ

**Готович В. А. Математичне моделювання і статистичне оцінювання характеристик штатного режиму електроспоживання організацій – 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, 2019.*

Дисертацію присвячено розв’язанню актуальної задачі математичного моделювання і статистичного оцінювання характеристик режиму електроспоживання організацій для забезпечення штатного режиму споживання електроенергії в топології мережі організації. Забезпечення штатного режиму процесу електроспоживання організації запропоновано розглядати як сукупність двох взаємопов’язаних задач: задачі контролю якості електроенергії на вході електромережі організації та задачі контролю величини електроспоживання топологією електромережі організації.

Запропоновано загальну модель процесу електроспоживання організації у вигляді багатокомпонентного випадкового процесу з моментами розладу на поточних і тривалих інтервалах часу. Отримав подальший розвиток метод створення моделей процесу електроспоживання організації на основі даних вимірювань з використанням сучасних методів декомпозиції і виявлення моментів розладу динаміки часових рядів.

Запропоновано стохастичну модель електричної напруги електропостачання з динамікою спотворень в часі амплітуди і частоти, яка дає можливість врахувати всі

можливі варіанти погіршення якості електроенергії. Запропоновано варіант апаратно-програмного комплексу для моніторингу штатного режиму процесу електроспоживання організації.

*Ключові слова:* електроспоживання, виявлення моментів розладу, контроль динаміки електроспоживання, характеристики штатного режиму, характеристики якості електроенергії, штатний режим.

## АННОТАЦИЯ

**Готович В. А. Математическое моделирование и статистическое оценивание характеристик штатного режима электропотребления организаций – 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, 2019.*

Диссертация посвящена решению актуальной задачи математического моделирования и статистического оценивания характеристик режима электропотребления организаций для обеспечения штатного режима потребления электроэнергии в топологии сети организации. Обеспечение штатного режима процесса электропотребления организации предложено рассматривать как совокупность двух взаимосвязанных задач: задачи контроля качества электроэнергии на входе электросети организации и задачи контроля величины электропотребления топологией электросети организации.

В качестве характеристик штатного режима процесса электропотребления организации предлагается рассматривать характеристики качества электроэнергии и суммарную величину потребления электроэнергии топологией электросети организации.

Предложена общая модель процесса электропотребления организации в виде многокомпонентного случайного процесса с разладкой, который формируется топологией электросети каждой организации на текущих и длительных интервалах времени и которая, в отличие от известных моделей, описывает физически обоснованные факторами формирования процесса трендовую, периодические и стохастической компоненты.

Получил дальнейшее развитие метод создания моделей процесса электропотребления организации на основе данных измерений с использованием современных методов декомпозиции и выявления разладок временных рядов, что позволило создавать конструктивные модели процесса электропотребления организации на текущих и длительных интервалах наблюдения. Приведен пример практического применения данного метода путем построения модели процесса электропотребления организации на интервале наблюдения длиной в один год. При этом, обосновано применение метода "Гусеница-SSA" для декомпозиции временного ряда на трендовую, периодические колебательные и стохастическую компоненты, а также обосновано применение метода PELT для поиска моментов времени изменения статистических характеристик компонент процесса (точек разладки).

Предложено стохастическую модель электрического напряжения электроснабжения с динамикой искажений во времени амплитуды и частоты которая дает возможность учесть все возможные варианты ухудшения качества электроэнергии.

Получили дальнейшее развитие метод и программное обеспечение компьютерного моделирования реализаций электрического напряжения для тестовых испытаний измерительного оборудования характеристик качества электроэнергии. В частности, предложена методика моделирования реализаций электрического напряжения с искажениями амплитуды и частоты сигнала в среде Simulink программного пакета MATLAB и структура базы данных для хранения результатов моделирования.

Предложен вариант аппаратно-программного комплекса для мониторинга штатного режима процесса электропотребления организации.

Ключевые слова: электропотребление, обнаружение моментов разладки, контроль динамики электропотребления, характеристики штатного режима, характеристики качества электроэнергии, штатный режим.

## ANNOTATION

**Gotovych V. A. Mathematical modeling and statistical estimation of characteristics of the regular mode of organizations` power consumption – Manuscript.**

*The thesis for the Scientific Degree of Candidate of Technical Sciences in the specialty 01.05.02 – mathematical modeling and computational methods (technical science). – Ternopil Ivan Puluuj National Technical University, Ternopil, 2019.*

The thesis is devoted to solving the topical problem of mathematical modelling and statistical estimation of characteristics of electric power consumption of organizations in order to provide a regular mode of electric power consumption in the topology of the organization's network. The maintenance of the regular mode of the organization's electric power consumption process is proposed as a set of two interconnected tasks: the tasks of control the quality of electricity at the input of the power grid of the organization and the tasks of control the amount of electric power consumption by the topology of the organization's network.

A general model of the organization's electric power consumption process is proposed in the form of multicomponent random process with change points on current and long time intervals of observation. The method for creating models of the organization's electric power consumption process based on measurement data using modern methods of decomposition and detecting time series change points has been further developed.

A stochastic model of electric voltage supply with dynamics of distortion in time of amplitude and frequency is offered which allows taking into account all possible variants of deterioration of electric power quality. The variant of the hardware-software complex for the monitoring of the regular mode of the process of electric power consumption of the organization is offered.

Key words: electric power consumption, change points detection, control of power consumption dynamics, regular mode characteristics, electric power quality characteristics, regular mode.

Підписано до друку 23.08.2019 р.

Формат 60×90 Папір ксероксний.

Обл. вид. арк. 0,9

Наклад 100 прим. Зам. № 3250.

Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя.

46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56.

**E-mail: [vydavnytstvo@tu.edu.te.ua](mailto:vydavnytstvo@tu.edu.te.ua)**

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4226 від 08.12.11.