

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

Інститут загальної енергетики

Кваліфікаційна наукова

праця на правах рукопису

ЛУКА Олексій Володимирович

УДК 621.317.75:621.316.925

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В
ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ ПРИ НАЯВНОСТІ ВИЩИХ
ГАРМОНІК**

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового
ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

О. В. Лука

Науковий керівник:

Карпалюк Ігор Тимофійович,

доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Лука О. В. Методи та засоби обліку електричної енергії в електротехнічних комплексах при наявності вищих гармонік. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Національна академія наук. Інститут загальної енергетики, Україна, Київ 2026.

Дисертація присвячена вирішенню актуальної науково-технічної задачі розробки методів та засобів зменшення похибки обліку електричної енергії, спричиненої впливом гармонічних складових, що вирішується шляхом зменшення рівня гармонічних складових у мережі за рахунок створення умов для скорочення наднормативного споживання електричної енергії завдяки оптимізації теплопостачання.

Об'єктом дослідження є гармонічні складові в електричній системі і їх вплив на системи обліку електричної енергії і на роботу електротехнічного обладнання підприємства.

Предметом дослідження є способи виявлення, аналізу та контролю гармонічних складових в електричній мережі підприємства.

У *вступі* обґрунтовується актуальність теми дослідження, що безпосередньо впливає з високих вимог до якості електричної енергії в електричній системі теплопостачального підприємства. Описуються проблеми, пов'язані з наявністю гармонічних складових у мережі, їх впливом на роботу електротехнічного обладнання. Визначено мету і завдання дослідження, а також об'єкт і предмет дослідження.

У *першому розділі* наведено теоретичну основу дослідження, обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження. У цьому розділі сформульовано проблематику появи гармонічних складових у мережі теплопостачального підприємства. Окрему увагу приділено впливу

гармонічних складових на надійність та ефективність енергетичної системи, визначенню ключових причин їх виникнення та потенційних шляхів усунення.

У *другому розділі* представлено огляд сучасних засобів обліку електричної енергії, їх будова та принцип дії. Наведено основні складові приладів обліку, визначено їх переваги та недоліки в умовах наявності гармонічних складових у мережі. Обґрунтовано необхідність розробки стенда для перевірки роботи приладів обліку в граничних режимах вимірювання. Описано розроблений стенд для перевірки приладів обліку. Наведено результати вимірювань роботи приладів обліку за різних рівнів гармонічних збурень у мережі. Зроблено висновок, що підвищити відповідність показань приладів обліку при наявності гармонічних коливань в мережі не представляється можливим. Єдине рішення – це зменшити гармонічні збурення в електричній мережі.

У *третьому розділі* проведено аналіз заходів щодо зменшення гармонічних складових в електричній мережі. Описано взаємозв'язок між наявністю гармонічних збурень в електричній мережі та рівнем постачання тепла споживачам. Розроблено заходи щодо створення умов для припинення надспоживання електричної енергії споживачами шляхом зменшення використання електричної енергії для підігріву приміщень. Для забезпечення можливості реалізації таких заходів запропоновано систему моніторингу, яку описано в цьому розділі. Наведено математичні моделі та методи аналізу динамічних процесів, якими представлено потік даних від системи моніторингу. Описано розроблений алгоритм виявлення структурних змін часових рядів на основі математичного методу сингулярно-спектрального аналізу. Проведено перевірку працездатності розробленого алгоритму виявлення гармонічних збурень на фактичних даних електроспоживання житлового масиву великого міста.

Четвертий розділ присвячено економічним розрахункам впровадженню способу зменшення гармонічних збурень в електричній мережі. На основі чинних методик проведено оцінювання економічних збитків, зумовлених

впливом гармонічних складових та інших відхилень показників якості електричної енергії на роботу обладнання підприємства теплопостачання. Проведено оцінку економічних втрат і показано можливість їх зменшення внаслідок застосування запропонованого способу. Отримані результати підтверджують економічну доцільність використання запропонованого способу зменшення гармонічних складових в електричній мережі на основі використання алгоритму визначення гармонічних збурень, що дозволяє отримати зменшення збитків від гармонічних збурень в електричній мережі, підвищити надійність роботи електрообладнання та створити умови для більш ефективного функціонування систем теплопостачання й електропостачання.

У висновках наведено основні результати виконання дисертаційної роботи щодо вирішення поставлених завдань дослідження.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

- вперше було розроблено стенд для перевірки роботи приладів обліку електричної енергії за наявності сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень на межових значеннях, **що дало змогу** виявити залежності похибки приладів обліку електричної енергії від величини сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень в електричній мережі;

- вперше розроблено алгоритм визначення гармонічних збурень в електричній мережі із використанням математичного методу спектрально сингулярного аналізу даних теплової і електричної енергій, **що дозволило** визначити початок, тривалість та глибину режиму надспоживання електричної енергії, що є причиною виникнення гармонічних збурень;

- вперше запропоновано спосіб по зменшенню гармонічних збурень із використанням розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень в електричній мережі, **що дає можливість** сформувати команди точного відпуску теплової енергії теплопостачаючим підприємством з метою недопущення режиму надспоживання електричної енергії тим самим прибираючи основний

чинник гармонічних збурень і зменшуючи похибки приладів обліку електричної енергії.

Достовірність теоретичних дисертаційних досліджень підтверджено експериментами, проведеними на енергетичних вузлах підприємства КП «Харківські теплові мережі» з використанням спеціалізованого діагностичного обладнання АНТЕС-2. Експериментальні результати показали високу ефективність розроблених методів та інструментів для аналізу гармонічних збурень під час різних режимів роботи електротехнічного обладнання, підтвердили здатність за допомогою розробленого алгоритму визначити початок, тривалість та глибину режиму надспоживання електричної енергії, що є причиною виникнення гармонічних збурень. Використання розробленого способу по зменшенню гармонічних збурень із використанням розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень дозволило сформувати команди точного відпуску теплової енергії теплопостачаючим підприємством з метою недопущення режиму надспоживання електричної енергії тим самим прибираючи основний чинник гармонічних збурень і зменшуючи похибки приладів обліку електричної енергії.

Практичне значення одержаних результатів у галузі електричної інженерії полягає в наступному:

- підвищено достовірність обліку електричної енергії за рахунок зменшення гармонічних збурень в електричній мережі на засадах взаємопов'язаності споживання теплової та електричної енергій;
- підвищено надійність функціонування електричного обладнання на основі своєчасної ідентифікації та діагностування гармонічних складових в електричній мережі підприємства, що сприяє запобіганню пошкодженню обладнання та зниженню ризику аварійних ситуацій;
- розширено наукові та технічні знання, необхідні для розробки нових поколінь обладнання та систем електропостачання;

– підвищено енергоефективність споживання електроенергії за рахунок використання взаємопов’язаного енергопостачання.

Результати дисертаційної роботи використані на КП «Харківські теплові мережі» при впровадженні методів та засобів аналізу гармонічних збурень при різних режимах роботи електротехнічного обладнання (акт про впровадження від 12.09.2025 р., акт про впровадження від 02.06.2025 р., акт про впровадження від 20.06.2025 р.)

Ключові слова: електрична мережа, енергетична система, розподільна мережа, облік електричної енергії, гармонічні складові, моделювання, взаємопов’язаність споживання енергій, режими теплопостачання.

ABSTRACT

Luka O. V. Methods and means of accounting for electrical energy in electrical complexes in the presence of higher harmonics. – Qualification work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 – Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics (field of knowledge 14 – Electrical Engineering). National Academy of Sciences. Institute of General Power Engineering, Ukraine, Kyiv 2026

The dissertation is devoted to solving the relevant scientific and technical problem of developing methods and tools for reducing errors in electrical energy metering caused by the influence of harmonic components. This problem is addressed by reducing the level of harmonic components in the electrical network through the creation of conditions for limiting excessive electricity consumption by optimizing the heat supply system.

The *object of the research* is harmonic components in the electrical system and their impact on electrical energy metering systems and the operation of the enterprise's electrical equipment.

The *subject of the research* is methods for detecting, analyzing, and controlling harmonic components in the enterprise's electrical network.

The *introduction* substantiates the relevance of the research topic, which directly arises from the stringent requirements for electrical energy quality in the power system of a district heating enterprise. It describes the problems associated with the presence of harmonic components in the electrical network and their impact on the operation of electrical equipment. The aim and objectives of the research, as well as the object and subject of the study, are defined.

The *first chapter* presents the theoretical foundation of the research, substantiates the relevance of the topic, and defines the aim, objectives, object, and subject of the study. This chapter formulates the problem of the occurrence of harmonic components in the electrical network of a district heating enterprise. Particular attention

is paid to the impact of harmonic components on the reliability and efficiency of the power system, the identification of the key causes of their occurrence, and the determination of potential methods for their mitigation.

The *second chapter* presents a review of modern electrical energy metering devices, their structure, and operating principles. The main components of metering instruments are described, and their advantages and disadvantages under conditions of harmonic distortion in the network are identified. The necessity of developing a test bench for evaluating the performance of metering devices under extreme measurement conditions is substantiated. The developed test bench for testing metering devices is described. The results of measurements of metering device performance under different levels of harmonic disturbances in the network are presented. It is concluded that improving the accuracy and consistency of metering device readings in the presence of harmonic distortions in the electrical network is not feasible through the metering devices themselves. The only effective solution is to reduce harmonic disturbances in the electrical network.

The *third chapter* presents an analysis of measures aimed at reducing harmonic components in the electrical network. The relationship between the presence of harmonic disturbances in the electrical network and the level of heat supplied to consumers is described. Measures have been developed to create conditions for preventing excessive electricity consumption by reducing the use of electrical energy for space heating. To enable the implementation of these measures, a monitoring system is proposed and described in this chapter. Mathematical models and methods for the analysis of dynamic processes are presented to represent the data streams generated by the monitoring system. A novel algorithm for detecting structural changes in time series based on the mathematical method of singular spectrum analysis is described. The performance of the developed algorithm for detecting harmonic disturbances has been validated using actual electricity consumption data collected from a residential district of a large city.

The *fourth chapter* is devoted to the economic evaluation of implementing the proposed method for reducing harmonic disturbances in the electrical network. Based on established methodologies, the economic losses caused by the influence of harmonic components and other deviations in electrical energy quality indicators on the operation of district heating enterprise equipment are assessed. An assessment of the economic losses was carried out, demonstrating the potential for their reduction through the application of the proposed method. The obtained results confirm the economic feasibility of the proposed approach for reducing harmonic components in the electrical network based on the use of the developed algorithm for detecting harmonic disturbances. The proposed approach makes it possible to reduce losses caused by harmonic disturbances in the electrical network, improve the reliability of electrical equipment operation, and create conditions for the more efficient operation of both district heating and power supply systems.

The *conclusions* summarize the main results of the dissertation and their contribution to solving the research objectives.

The *scientific novelty* of the obtained results is as follows:

- dependencies between the measurement error of electrical energy metering devices and the presence of harmonic components in the network have been established, making it possible to identify the threshold value of the total harmonic distortion (THD) coefficient above which the metering error exceeds the permissible limits specified by standards;

- for the first time, an algorithm for detecting harmonic disturbances in an electrical network has been developed using the mathematical method of singular spectrum analysis applied to thermal and electrical energy data. The algorithm makes it possible to determine the onset, duration, and severity of excessive electricity consumption regimes that give rise to harmonic disturbances;

- for the first time, a method for reducing the measurement error of electrical energy metering devices has been proposed based on the developed algorithm for detecting harmonic disturbances in the electrical network. The proposed method

enables the generation of control signals for the precise regulation of thermal energy supply by the district heating enterprise in order to prevent regimes of excessive electricity consumption. By eliminating this major contributing factor to harmonic disturbances, the method reduces the impact of harmonics on the network and improves the accuracy of electrical energy metering devices.

The validity of the theoretical findings of the dissertation was confirmed through experiments conducted at the power facilities of the municipal enterprise Kharkiv Thermal Networks using the specialized diagnostic system ANTES-2. The experimental results demonstrated the high effectiveness of the developed methods and tools for analyzing harmonic disturbances under various operating conditions of electrical equipment. They also confirmed the capability of the developed algorithm to determine the onset, duration, and severity of excessive electricity consumption regimes that give rise to harmonic disturbances. The application of the proposed method for reducing harmonic disturbances, based on the developed algorithm for their detection, enabled the generation of control commands for the precise regulation of thermal energy supply by the district heating enterprise. This prevented excessive electricity consumption, thereby eliminating the primary cause of harmonic disturbances and improving the accuracy of electrical energy metering.

The *practical significance* of the obtained results in the field of electrical engineering is as follows:

- the accuracy and reliability of electrical energy metering have been improved through the reduction of harmonic disturbances in the electrical network based on the interrelationship between thermal and electrical energy consumption;
- the reliability of electrical equipment operation has been enhanced through the timely identification and diagnosis of harmonic components in the enterprise's electrical network, thereby helping to prevent equipment damage and reduce the risk of emergency situations;
- scientific and technical knowledge necessary for the development of new generations of electrical equipment and power supply systems has been expanded;

– the energy efficiency of electricity consumption has been improved through the use of integrated energy supply based on the interdependence of different forms of energy.

The results of the dissertation research have been implemented at the municipal enterprise «Kharkiv Thermal Networks» in the introduction of methods and tools for the analysis of harmonic disturbances under various operating conditions of electrical equipment. The practical implementation of the research findings is confirmed by implementation certificates (dated 12.09.2025, 02.06.2025, and 20.06.2025).

Keywords: electrical network, power system, distribution network, electrical energy metering, harmonic components, modeling, interdependence of thermal and electrical energy consumption, heat supply operating modes.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових фахових виданнях України та виданнях, що індексуються у Scopus/Web of Science:

Статті у наукових фахових виданнях України:

1 **Лука, О. В.** Вплив межових значень теплопостачання на якість електричної енергії. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 2025. Т.2, №25 С. 54-61, URL: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-6> (Фахове видання категорії Б)

2 Якість електричної енергії як функція зв'язаного енергоспоживання міських енергомереж/ О. Г. Гриб, І. Т. Крапалюк, С. В. Швець, **О. В. Лука**, Є. О. Кауркін // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Х.: НТУ «ХП», 2022. – № 2. – С. 60–65 <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2022.2.10> (Фахове видання категорії Б)

(0,9 друк. арк., особистий внесок здобувача: запропонована ідея використання концепції загальноенергетичного споживання суб'єктами

господарювання, побудована модель зв'язаності енергій, 0,4 друк. арк.. Гриб О. Г. – формування загально наукової ідеї дослідження, постановка мети та завдань, загальне наукове керівництво, постановка завдання контролю якості, 0,1 друк. арк.. Карпалюк І.Т. – формування методичних підходів, постановка завдання моніторингу динамічних процесів, 0,1 друк. арк.. Швець О.В. – збір та аналіз вихідних даних, узагальнення практичних прикладів, підготовка ілюстративних матеріалів, 0,1 друк. арк. Кауркін Є.О. – огляд математичних моделей і методів для моніторингу властивостей динамічних процесів, 0,2 друк. арк..)

3 Підвищення надійності електроенергетичних об'єктів за рахунок використання безпілотних літальних апаратів / О. Г. Гриб, І. Т. Крапалюк, **О. В. Лука**, Є. О. Кауркін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Х.: НТУ «ХПІ», 2023. – № 1. – 96 с. С 87-93 <https://doi.org/doi:10.20998/2411-3441.2023.1.15> (Фахове видання категорії Б)

(0,8 друк. арк., особистий внесок здобувача: розробка ідеї забезпечення безперебійності електроенергетичних об'єктів через кількість оглядів розрахунок щільності відмов від часу експлуатації електроенергетичних об'єктів, 0,4 друк. арк.. Гриб О. Г. – формування загально наукової ідеї дослідження, постановка мети та завдань, загальне наукове керівництво, 0,1 друк. арк.. Карпалюк І.Т. – збір та аналіз вихідних даних, узагальнення практичних прикладів, підготовка ілюстративних матеріалів, 0,1 друк. арк. Кауркін Є.О. – проведення економічних розрахунків використання безпілотних літальних апаратів для підвищення надійності електроенергетичних об'єктів, 0,2 друк. арк..)

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав, які включено до міжнародних наукометричних баз:

4 Sokol, Y., Babak, V., Zaporozhets, A., Gryb, O., Karpaliuk, I., **Luka, O.** (2024). Influence of Corona Discharge on Electric Power Supply Parameters. Studies in Systems, Decision and Control, vol 5 09. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_2 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

(1,2 друк. арк., особистий внесок здобувача: розробка взаємопов'язаності гармонічних складових струму і напруги в електричній мережі із коронним розрядом, 0,3 друк. арк.. Сокол Є.І. – формування загально наукової ідеї дослідження, постановка мети та завдань, загальне наукове керівництво, 0,1 друк. арк.. Бабак В.П. – формулювання узагальненої характеристика втрат потужності на коронний розряд в електричній мережі, 0,2 друк. арк.. Запорожець А.О. – групування і конкретизація методів оцінки втрат від корони і гармонічних збурень в електричній системі, 0,2 друк. арк. Гриб О.Г. – формування методичних підходів, аналіз тенденцій обрахування втрат на коронному розряді за умови поганої погоди, 0,2 друк. арк.. Карпалюк І.Т. – збір та аналіз вихідних даних, узагальнення практичних прикладів, підготовка ілюстративних матеріалів, 0,2 друк. арк..)

Праці апробаційного характеру:

5 Zaporozhets, A., Babak, V., Starenkiy, V., Gryb, O., Karpaliuk, I., **Luka, O.** Instruments for Identification of Corona Discharge Presence by Spectral Characteristics of Acoustic Radiation Studies in Systems, Decision and Control, 2024, 509, pp. 113-136 nel: https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_6 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

6 Визначення коронного розряду в електричних мережах із застосуванням безпілотних літальних апаратів з метою підвищення якості електропостачання: монографія / Є. І. Сокол, І. Т. Карпалюк, О. Г. Гриб, А.О. Запорожець, Г.А. Сендерович, С.В. Швець, В.В. Скопенко, Д.А. Гапон, О.Ю. Заковоротний, В.П. Старенький, Н.С. Захаренко, Н.М. Шматько, **О.В. Лука**, Є.О. Кауркин, О.Д.

Светелик, В.І. Васильченко, О.О. Светелик, Ю.К. Воцинський, Р.І. Дем'яненко. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 301 с.

7 Несинусоїдальні і несиметричні режими в електроенергетичних системах / Є. І. Сокол, Г. А. Сендерович, О.Г. Гриб, Т.С. Донецька, А. О. Запорожець, В. В. Скопенко, І. Т. Карпалюк, Д. А. Гапон, О. Ю. Заковоротний, В. Є. Кривоносов, В. П. Старенький, Н. С. Захаренко, **О. В. Лука**, С. С. Козлов. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 202 с.

8 Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення: монографія / Є. І. Сокол, Д. А. Гапон, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець, І. Т. Карпалюк, В.В. Скопенко, О.Ю. Заковоротний, Н.В. Рудевіч, В.П. Старенький, Н.С. Захаренко, Н.М. Шматько, **О.В. Лука**, Є.О. Кауркин, О.Д. Светелік, В.І. Васильченко, О.О. Светелік, Ю.К. Воцинський, Р.І. Дем'яненко / Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 330 с.

9 Сокол Є. І. Релейний захист та автоматика в енергетиці і транспорті: монографія / Є. І. Сокол, О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, В. М. Баженов, А. О. Запорожець, Д.А. Гапон, В.П. Старенький, В.В. Скопенко, В.І. Васильченко, О.Ю. Заковоротний, С.В. Швець, О.О. Светелік, Р.М. Лісиченко, Т.С. Донецька, Р.І. Дем'яненко, Є.О. Кауркін, **О.В. Лука**/ Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2023. – 504 с

10 Сокол Є. І. Релейний захист в системах електропостачання: монографія / Є. І. Сокол, В. Є. Кривоносов, О. Г. Гриб, І.Т. Карпалюк, А.О. Запорожець, В.П. Старенький, В.В. Скопенко, О.Ю. Заковоротний, Р.М. Лисиченко, Є.О. Кауркін, **О.В. Лука** / Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. – Х.: ФОП Бровін О. В., 2023. – 426 с.

Тези конференції

11 Лука О. В., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Представлення взаємопов'язаності енергій через їх якість / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 19-21 жовтня 2022 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – 1107 с. – С. 81

12 Лука О. В., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Лисиченко Р. М. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗВ'ЯЗАНОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІСЬКИХ ЕНЕРГОМЕРЕЖ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ / Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК: [Електронний ресурс] : Матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22 грудня 2022 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Х.: 2022. – 214 с.– С. 11-12

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ	19
ВСТУП.....	20
Розділ 1 СТАН, КОНТРОЛЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ В МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА.....	26
1.1 Нормовані показники якості електричної енергії	26
1.2 Вплив вищих гармонік на роботу електрообладнання енергосистеми.....	27
1.3 Експериментальні дослідження показників якості електричної енергії в мережі підприємства	30
1.3.1 Характеристика системи електропостачання теплопостачаючого підприємства	30
1.3.2 Результати вимірювань якості електричної енергії	32
1.4 Причини виникнення гармонічної складової в електричній мережі	35
1.5 Проблеми обліку електричної енергії в мережі із наявністю гармонічних збурень	36
Висновки по розділу 1	36
Розділ 2 ПРИЛАДИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ	38
2.1 Загальна класифікація приладів обліку електричної енергії	38
2.2 Будова електронного лічильника електроенергії	41
2.2.1 Структурні схеми електронних лічильників	42
2.2.2 Датчики напруги.....	44
2.2.3 Датчики струму.....	47
2.2.4 Перетворювачі аналогової величини в дискретну	53
2.2.5 Схеми електронних приладів обліку	55
2.3 Прилади обліку підприємства	57
2.4 Стенд для перевірки діапазонів роботи приладів обліку електричної енергії.....	57
2.4.1 Структурна схема стенду.....	58
2.4.2 Схема стенда	68

2.4.3 Результати вимірювань приладів обліку.....	74
Висновки по розділу 2.....	76
Розділ 3 ЗАХОДИ ЗІ ЗМЕНШЕННЯ ГАРМОНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ	77
3.1 Заходи по зменшенню гармонічної складової в електричній мережі	77
3.2 Зменшення гармонічної складової за рахунок створення умов припинення надспоживання електричної енергії.....	78
3.2.1 Причина надспоживання електричної енергії – дефіцит теплової енергії.....	79
3.2.2 Регулювання відпуску тепла на опалення	81
3.2.3 Моніторинг якості тепlopостачання	82
3.2.4 Пов’язаність різних типів енергії.....	83
3.3 Умови побудови системи моніторингу	87
3.4 Огляд математичних моделей та методів для моніторингу властивостей динамічних процесів	88
3.4.1 Аналіз структури часових рядів виявлення причинно-наслідкових зв’язків динамічної системи.....	88
3.4.2 Виявлення моментів зміни властивостей часового ряду.....	89
3.4.3 Виявлення моментів виходу окремих параметрів процесу за допустиму область значень	92
3.5 Алгоритм виявлення структурних змін часових рядів на основі лінійного варіанта сингулярно-спектрального аналізу.....	94
3.6 Перевірка алгоритму виявлення гармонічної складової на основі сингулярно-спектрального аналізу	98
3.6.1 Дані для використання алгоритму	99
3.6.2 Експрес-аналіз.....	100
3.6.3 Детальний аналіз.	102
3.6.4 Додатковий аналіз (дослідження низки залишків).	106
Висновки по розділу 3.....	109

Розділ 4	ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ	
ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ		111
4.1	Розрахунок економічних збитків від гармонічних складових в	
	електричній мережі комунального підприємства «Харківські теплові	
	мережі»	111
4.1.1	Розрахунок збитку від зниження якості електроенергії.....	112
4.1.2	Розрахунок додаткового обсягу теплової енергії для забезпечення	
	умови зменшення гармонічної складової	119
4.1.3	Розрахунок економічного ефекту	120
	Рекомендації по зменшенню похибки приладів обліку електричної енергії	
	в мережі із наявністю гармонічних збурень.	122
	Висновки по розділу 4.....	124
ВИСНОВКИ		126
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ		128
ДОДАТКИ		144
	Додаток А Прилад обліку якості електричної енергії АНТЕС АК-3Ф.....	144
	Додаток Б Результати замірів показників якості електричної енергії в	
	розподільній мережі підрозділу підприємства КП «Харківські теплові	
	мережі»	147
	Додаток В Список публікацій здобувача за темою дисертації.....	157
	Додаток Г Акти впровадження результатів дослідження	162

ПЕРЕЛІК ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ

СКГС – сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень

ПЯЕЕ – показники якості електричної енергії

ЯЕЕ – якість електричної енергії

ЕЕС – електроенергетична система

ВЛ – високовольтна лінія

ТС – трансформатор струму

АЦП – аналого-цифрове перетворення

THD – Total Harmonic Distortion (сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень)

RMS – Root Mean Square (середньоквадратичне значення)

ЕРМ – електрична розподільна мережа

ПС – підстанція

Вт – Ват, одиниця вимірювання потужності;

Вт·год – Ват-година, одиниця вимірювання енергії;

КП – комунальне підприємство;

СУ – системи управління;

HSE – оцінка гармонічного стану (harmonic state estimation)

ВСТУП

Актуальність теми. Наявність у електричній мережі значних збурюючих факторів призводить до погіршення якості електричної енергії. В таких умовах процес обліку електричної енергії зазнає впливів на результати вимірювань і зниження їх достовірності.

Для України втрати електричної енергії, зумовлені похибками її обліку або втратами в електрообладнанні внаслідок зниження якості електричної енергії, є не лише технічною проблемою, а й суттєвим економічним викликом. Це обумовлює необхідність забезпечення коректного обліку всієї виробленої та відпущеної споживачам електричної енергії.

Питанням забезпечення та підвищення якості електричної енергії присвячено праці багатьох вітчизняних і зарубіжних учених, серед яких: А.Ф.Жаркін, І.В. Жежеленко, О.Г. Гриб, Ю.Л. Саєнко, В.І. Васильченко, Ю.Ф. Тесик, М.Й. Бурбело, Г.А.Сендерович, Manuel Pérez-Donsión, Gianpaolo Vitale, Gerald B. Bollen і ряд інших.

З якісними показниками електричної енергії пов'язані не тільки втрати енергії, а і надійність роботи мереж, і як наслідок, собівартість продукції [1, 2, 3, 4, 5]. Покращення якості електричної енергії (ЯЕЕ) в розподільних мережах є вкрай важливою задачею.

Показники якості електричної енергії регламентуються нормами [6, 7, 8], серед яких гармонічні складові струму і напруги в живлячій мережі є основними чинниками погіршення якості електричної енергії при нормальних режимах роботи мережі [3, 9, 10, 11].

Проведений аналіз наукової літератури і висновки вчених в галузі підтверджують актуальність досліджень із розробки заходів по зниженню гармонічних складових в мережі для покращення умов роботи приладів обліку і роботи обладнання підприємства.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана у відділі прогнозування розвитку

електроенергетичного комплексу Інституту загальної енергетики Національної академії наук України. Матеріали роботи включають результати досліджень за темою «Дослідження якості електричної енергії в електричних мережах підприємств комунального господарства» (ДР №0123U104279, 2023-2024pp.), виконаних в Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут», де здобувач приймав участь у виконанні розділу «Вплив якісних показників електричної енергії на керованість мережевих насосів».

Мета та завдання дослідження.

Метою дисертаційного дослідження є розробка та впровадження методів та інструментів для ідентифікації, аналізу та контролю гармонічних складових в електричній мережі підприємства.

Для досягнення мети дослідження було сформульовано та вирішено

наукові завдання:

- визначити основні фактори та причини виникнення гармонічних збурень в електротехнічній системі підприємства (на прикладі підприємства КП «Харківські теплові мережі»);

- розглянути принцип дії та схемні рішення приладів обліку електричної енергії з метою визначення похибок від впливу гармонічних збурень в електричній мережі;

- розробити стенд для визначення невідповідності показань приладів обліку електричної енергії за наявності гармонічних збурень в електричній мережі;

- розробити спосіб по зменшенню гармонічних збурень в електричній мережі;

практичні завдання:

- провести перевірку розробленого способу по зменшенню гармонічних збурень в електричній мережі підприємства КП «Харківські теплові мережі»;

– розробити рекомендації по зменшенню гармонічних збурень в електричній мережі на базі низки заходів за розробленим способом по зменшенню гармонічних збурень.

Об’єктом дослідження є гармонічні складові в електричній системі і їх вплив на системи обліку електричної енергії і на роботу електротехнічного обладнання підприємства.

Предметом дослідження є способи виявлення, аналізу та контролю гармонічних складових в електричній мережі підприємства.

Методи дослідження:

Для вирішення поставлених завдань використані основні положення теоретичної електротехніки, математичного моделювання, теорії ймовірностей і математичної статистики. Теоретичні результати мають співвідношення із результатами вимірів в електричних мережах електроенергетичної системи і з експериментальними дослідженнями на основі моделювання несинусоїдальних режимів з використанням програмних засобів, таких як Matcad і пакета Simulink SimPowerSystems системи Matlab.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

В результаті виконання роботи отримані наступні нові наукові результати:

– вперше було розроблено стенд для перевірки роботи приладів обліку електричної енергії за наявності сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень на межових значеннях, **що дало змогу** виявити залежності похибки приладів обліку електричної енергії від величини сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень в електричній мережі;

– вперше розроблено алгоритм визначення гармонічних збурень в електричній мережі із використанням математичного методу спектрально сингулярного аналізу даних теплової і електричної енергій, **що дозволило** визначити початок, тривалість та глибину режиму надспоживання електричної енергії, що є причиною виникнення гармонічних збурень;

– вперше запропоновано спосіб по зменшенню гармонічних збурень в електричній мережі із використанням розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень в електричній мережі, що дає можливість сформувати команди точного відпуску теплової енергії теплопостачаючим підприємством з метою недопущення режиму надспоживання електричної енергії тим самим прибираючи основний чинник гармонічних збурень і зменшуючи похибки приладів обліку електричної енергії.

Практичне значення отриманих результатів.

1 Підвищено достовірність обліку електричної енергії за рахунок зменшення гармонічних збурень в електричній мережі на основі взаємопов'язаності впливу теплової та електричної енергії;

2 Підвищено надійність функціонування обладнання на основі своєчасної ідентифікації та діагностування гармонічних складових в електричній мережі підприємства, що сприяє запобіганню пошкодженню обладнання та зниженню ризику аварійних ситуацій;

3 Розширено наукові та технічні знання, які можуть бути використані при розробці нових поколінь обладнання та систем електропостачання;

4 Підвищено енергоефективність споживання електроенергії за рахунок використання взаємопов'язаного енергопостачання.

Дисертаційна робота виконана із застосуванням фундаментальних положень теоретичної електротехніки. При розробленні моделей для опису процесів керування спектральними характеристиками перетворювачів енергії використано аналітичні методи. Узгодженість експериментальних, теоретичних і числових результатів підтверджує коректність застосованих методів та достовірність отриманих результатів дослідження.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є завершеною науковою працею автора. Положення і результати, що виносяться на захист дисертаційної роботи, отримані здобувачем особисто. За темою дисертації загалом

опубліковано 12 наукових праць. У роботах, опублікованих у співавторстві, автору належать:

[1] – ідея публікації, підбор всього матеріалу, підготовка даних, висновки; [2] – запропонована ідея використання концепції загальноенергетичного споживання суб'єктами господарювання, побудована модель зв'язаності енергій ідея публікації, підбор всього матеріалу, підготовка даних, висновки; [3] – розробка ідеї забезпечення безперебійності електроенергетичних об'єктів через кількість оглядів розрахунків щільності відмов від часу експлуатації електроенергетичних об'єктів; [4] – розробка взаємопов'язаності гармонічних складових струму і напруги в електричній мережі із коронним розрядом; [5] – проведення замірів акустичних сплесків гармонічних шумів, обробка даних замірів на визначення гармонічної складової по спектральним характеристикам; [6] – визначення впливу коронним розрядом на гармонічну складову струму і напруги в електричній мережі, обробка даних замірів акустичної складової коронного розряду за спектральними характеристиками; [7] – проведення замірів різних величин електричної енергії при наявності в мережі вищих гармонік, обробка результатів експериментів, узагальнення матеріалу по вимірюванням в електричній мережі за наявності вищих гармонік; [8] – розробка методів та моделей обліку електричної енергії з урахуванням її якості, обґрунтування обліку електричної енергії з урахуванням її якості на математичних моделях; [9] – проробка даних по автоматичному частотному розвантаженню енергосистем в нормальних і аварійних режимах роботи; [10] – участь у підготовці та обробці матеріалу по елементах релейного захисту, класифікація типів реле, опис їх особливостей, принципи роботи, особливості, аналізі методів регулювання;

Апробація результатів дисертації. Основні результати досліджень доповідались та обговорювались на наступних наукових конференціях: – «XXX міжнародна науково-практична конференція MicroCAD-2022» (Харків, 2022 р.); «Електроенергетика, електромеханіка та технології в АПК» (Харків, 2022 р.).

Публікації. Основний зміст дисертаційної роботи викладено в 12 наукових публікаціях, з них: 5 – монографій, 5 – статей у наукових фахових виданнях (в тому числі 2 – статті у закордонному виданні), 2 – тези доповідей у матеріалах конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Повний обсяг дисертації складає 164 сторінки, у тому числі: 143 сторінки основного тексту, 143 найменування використаних джерел на 16 сторінках, 4 додатки на 21 сторінці. Основний текст містить 6 таблиць і 55 рисунків.

РОЗДІЛ 1 СТАН, КОНТРОЛЬ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ГАРМОНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ В МЕРЕЖІ ПІДПРИЄМСТВА

1.1 Нормовані показники якості електричної енергії

Показники якості електричної енергії описують як міжнародні так і національні стандарти. Є два основних міжнародних стандарти, що визначають параметри якості електроенергії, це:

EN 50160 – європейський стандарт, що встановлює характеристики напруги у громадських розподільних мережах. Дублюючий державний стандарт ДСТУ EN 50160:2023 Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160:2022, IDT);

IEC 61000 – серія стандартів Міжнародної електротехнічної комісії з електромагнітної сумісності. Дублюючий державний стандарт ДСТУ EN IEC 61000-4-3:2021 Електромагнітна сумісність.

Ці документи надають нормативну базу для оцінки та контролю якості електроенергії, що є вкрай важливим для енергетичних компаній.

Терміни та визначення якості електроенергії описані в стандарті [7]. Норматив оговорює вимоги до напруг гармонік і інтергармонік [7]:

Напруга гармонік

За нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги кожної гармоніки, усереднених за 10-хвилинний інтервал, мають бути меншими або рівними значенням, наведеним у таблиці 1.1. Резонанси можуть спричинювати підвищення напруг окремих гармонік. Крім того, сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) напруги електропостачання (з урахуванням усіх гармонік до 40-ї включно) має бути не більшим або рівним 8%.

Таблиця 1.1 – Величини напруг окремих гармонік до 25-го порядку в точках приєднання у відсотках від напруги основного складника U_1

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
не кратні 3		кратні 3			
Порядок h	Відносна амплітуда U_h	Порядок h	Відносна амплітуда U_h	Порядок h	Відносна амплітуда U_h
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	0,5 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,5 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

Напруги інтергамонік

Рівень інтергармонік збільшується внаслідок розвитку перетворювачів частоти й подібного регульовального обладнання. У деяких випадках інтергармоніки, навіть низького рівня, спричиняють зростання флікера.

1.2 Вплив вищих гармонік на роботу електрообладнання енергосистеми

Несинусоїдальність напруги або струму в ланцюзі характеризується гармонічними складовими [14, 15, 16, 17].

Відповідно до вимог [7] показниками ЯЕЕ, що відносяться до гармонічних складових напруги є:

- значення коефіцієнтів гармонічних складових напруги до 40-го КУ (n) в процентах напруги основної гармонічної складової U_1 в точці передачі електричної енергії;

- значення сумарного коефіцієнта гармонічних складових напруги (відношення середньоквадратичного значення суми всіх гармонічних складових до 40-го порядку до середньоквадратичного значення основної складової) КУ в точці передачі електричної енергії.

Згідно робіт [5, 13, 18, 19] невідповідність ЯЕЕ встановленим нормам стандартів [7, 19] призводить до:

- зниження ефективності процесів виробництва, передачі, розподілу та споживання електричної енергії;
- зниження надійності електропостачання, погіршення функціонування обладнання та технологічних процесів споживачів;
- прискореного старіння ізоляції електрообладнання;
- збоїв в роботі пристроїв релейного захисту та автоматики, телемеханіки і зв'язку;
- зменшення пропускної здатності електричних мереж;
- збільшення похибки приладів;
- збільшення втрат електричної енергії в основних елементах ЕРМ.

Вплив несинусоїдальності напруги на процеси передачі і розподілу електричної енергії ЯЕЕ тісно пов'язаний із надійністю електропостачання [5, 20, 21, 22], оскільки при невідповідності показників вимогам [7] зростає знос обладнання в мережах. Вплив гармонічних складових напруги на електрообладнання виражається в скороченні терміну його служби через прискорене старіння ізоляції в результаті незворотних фізико-хімічних процесів, що протікають під впливом електричних полів, створюваних гармонічними складовими струму [19]. Простежується явний зв'язок між несинусоїдальністю і надійністю електропостачання [19, 23, 24]. Крім зниження надійності електропостачання, при несинусоїдальності напруги створюються додаткові втрати в електричних машинах, мережах та трансформаторах, відбуваються збої в роботі релейного захисту, автоматики, телемеханіки і зв'язку, мають місце і інші негативні наслідки [25, 26, 27]. Втрати від гармонічних складових струму в електричних мережах складають кілька відсотків від технічних втрат [28, 29, 30, 46].

Наявність гармонічних складових в мережі погіршує роботу телемеханіки, викликає збої при використанні силових ланцюгів в якості каналів зв'язку і ускладнює використання простоїв системи телеуправління по високовольтним лініям в розподільних мережах [19, 25]. Несинусоїдальність напруги впливає на

похибку приладів обліку. Значення похибки залежить від місця установки лічильників, їх вимірювальної системи і інших чинників. Похибки електронних і індукційних лічильників при несинусоїдній напрузі досягають 5-10% [19].

Слід зауважити, що стандартом ДСТУ EN 50160: 2023 [7], чинним в Україні, не встановлюються обмеження за рівнем гармонічних спотворень напруги для гармонік порядку вище 25. Це пояснюється їх незначною величиною. Однак, в [31] проведені дослідження, що показують наявність гармонічних складових 30-х-40-х порядків.

Наявність гармонічних спотворень струмів і напруг в системі електропостачання завдає шкоди всім суб'єктам електричної розподільної мережі. Також слід зазначити залежність величини збитку, що наноситься електроустаткуванню розподільної мережі вищими гармоніками струму і напруги, від їх порядку. Додатковий вплив окремих гармонік на електрообладнання приведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Додатковий вплив гармонік на електрообладнання

Тип обладнання	Порядок гармонік(и)	Вид впливу
Кабельні лінії	Непарні, кратні трьом	Перегрівання й руйнування нульового дроту
Кабельні лінії металургійних комбінатів	30-ї - 40-ї	Однофазні замикання на землю з можливою пожежею
Обертові машини	5-а і 7-а; 11-а і 13-а	Коливальний момент, що викликає нерівномірність обертання валу
Однофазні імпульсні джерела живлення	3-я і 5-а	Зниження завадостійкості і перегрівання
Трифазні випрямлячі (схема Ларіонова)	5-а і 7-а	Зниження завадостійкості
12-пульсні випрямлячі	11-а і 12-а	Зниження завадостійкості
Трансформатори з обмотками «зірка з ізольованою нейтраллю»	3-я і 9-а	Перенапруження
Телекомунікації та зв'язок	Гармоніки з частотою, близькою до несучої	Завади
Конденсаторні батареї	Гармоніки резонансної частоти	Пробій

1.3 Експериментальні дослідження показників якості електричної енергії в мережі підприємства

Одна із складових низької якості електричної енергії є наявність вищих гармонік в електричній мережі [1, 3, 19].

1.3.1 Характеристика системи електропостачання теплопостачаючого підприємства

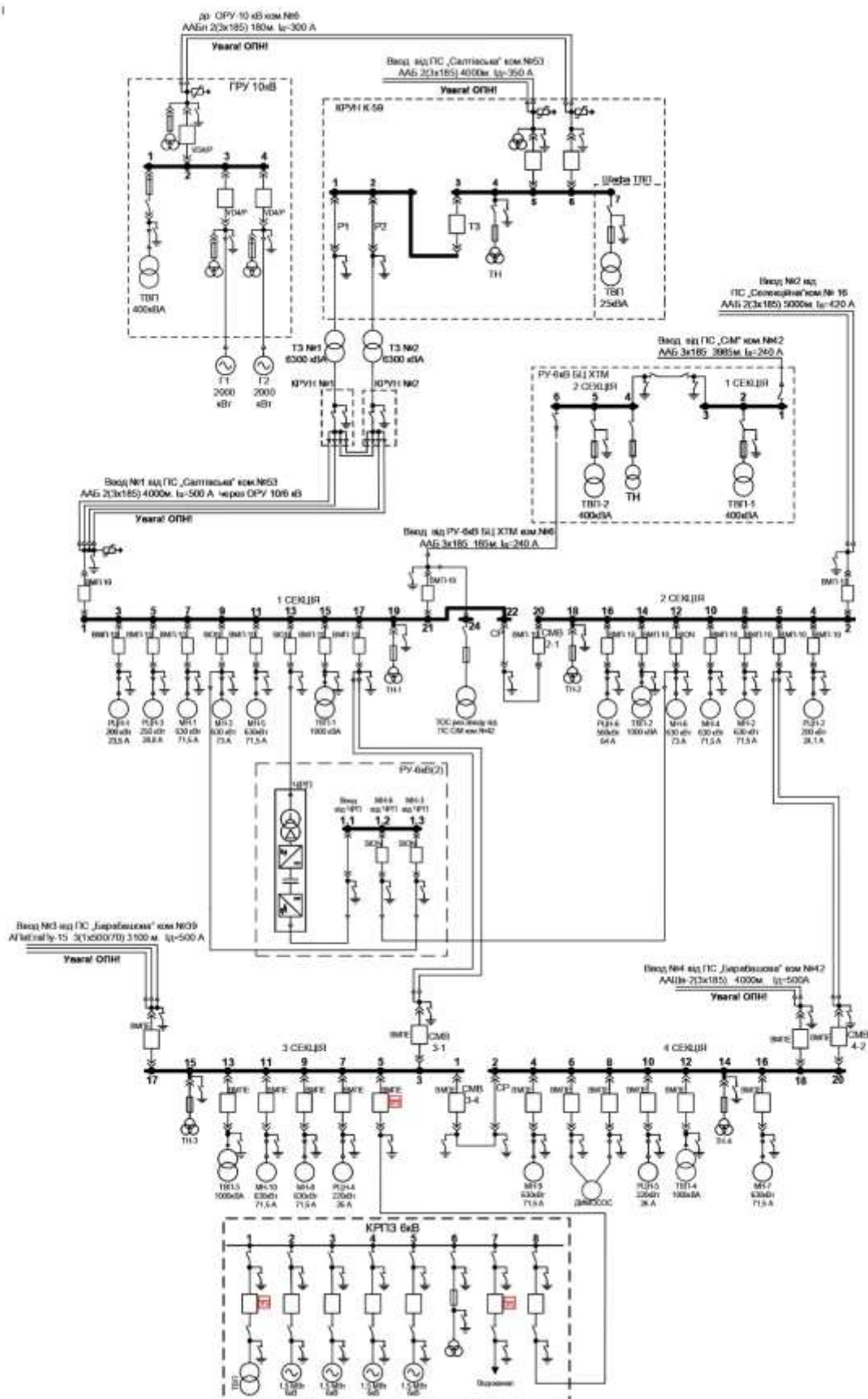
Система живлення комунального підприємства «Харківські теплові мережі» від електричної мережі здійснюється з підстанцій 110/10 і підстанцій 10/0.4. Це пов'язано із територіальною розгалуженістю підприємства і різні ділянки підприємства живляться від різних електричних понижувальних підстанцій.

Комірка підстанції 110/10 кВ забезпечує електропостачання не лише підприємства КП «Харківські теплові мережі», а й інших промислових споживачів, а також понижувальних підстанцій, які, у свою чергу, живлять побутових споживачів. У розгалуженій міській електричній мережі, де до підстанції підключено тисячі споживачів, постійно виникають різноманітні режимні події, зокрема аварії, короткі замикання, післяаварійні режими, а також підключення та відключення потужних навантажень. Такі процеси призводять до появи різноманітних впливів на якість електричної енергії.

Основним споживачем КП «Харківські теплові мережі» є електричні двигуни станцій підкачки теплоносія, підключені до різних комірок шин головної понижувальної підстанції 110/10 кВ, які і є джерелом вищих гармонік.

Здебільшого саме споживачі і є джерелом погіршення якості електричної енергії, в тому числі споживачі є джерелом вищих гармонік в мережі [1, 2, 3, 4].

На рисунку 1.1 представлена схема підключення обладнання одного із підрозділів КП «Харківські теплові мережі».



1.3.2 Результати вимірювань якості електричної енергії

Параметри якості електричної енергії визначалися в різних вузлах схем електричних мереж. Вимірювання виконувалися на межі балансової належності постачальника і споживачів [3, 4]. Вимірювання якості електроенергії виконувалися за допомогою мікропроцесорних аналізаторів напруг і струмів в електричних мережах типу АНТЕС АК-3Ф (див. рис. А.1).

Структурна схема приладу наведена в додатку А на рисунку А.2. Перелік параметрів вимірювання приладу АНТЕС АК-3Ф представлено в додатку А в таблицях А.1, А.2.

Загальна тривалість безперервних вимірювань з урахуванням вимог п. 5.2.1 [22] що були проведені на підприємстві становила не менше семи діб. Обсяг вимірювань, зроблений за час моніторингу ПЯЕЕ, дозволяє вважати, що значення і діапазони зміни параметрів електричної енергії в мережі, КУ і КУ(n) визначено достовірно. Всього було проведено більше 50 вимірів ПЯЕЕ на об'єктах електроенергетики, розташованих на території підприємства, що під'єднані як споживачі до підстанції 110/10 кВ.

В результаті замірів в кожній точці контролю були отримані докладні протоколи вимірів якості електроенергії по кожному показнику.

Аналізуючи графіки коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої напруги (рис. 1.2), можна відзначити, що їх рівні нижче нормально допустимих значень.

На рис. 1.3 представлені графіки і протоколи вимірів коефіцієнтів n-й гармонічної складової напруги в фазах "А", "В", "С" в мережі 0,4 кВ.

Результати вимірювань якості електричної енергії на підстанціях підприємства показали наявність гармонічних спотворень у всіх досліджених режимах. Найбільші рівні зафіксовано для гармонік 3-ї, 5-ї, 7-ї та 11-ї.

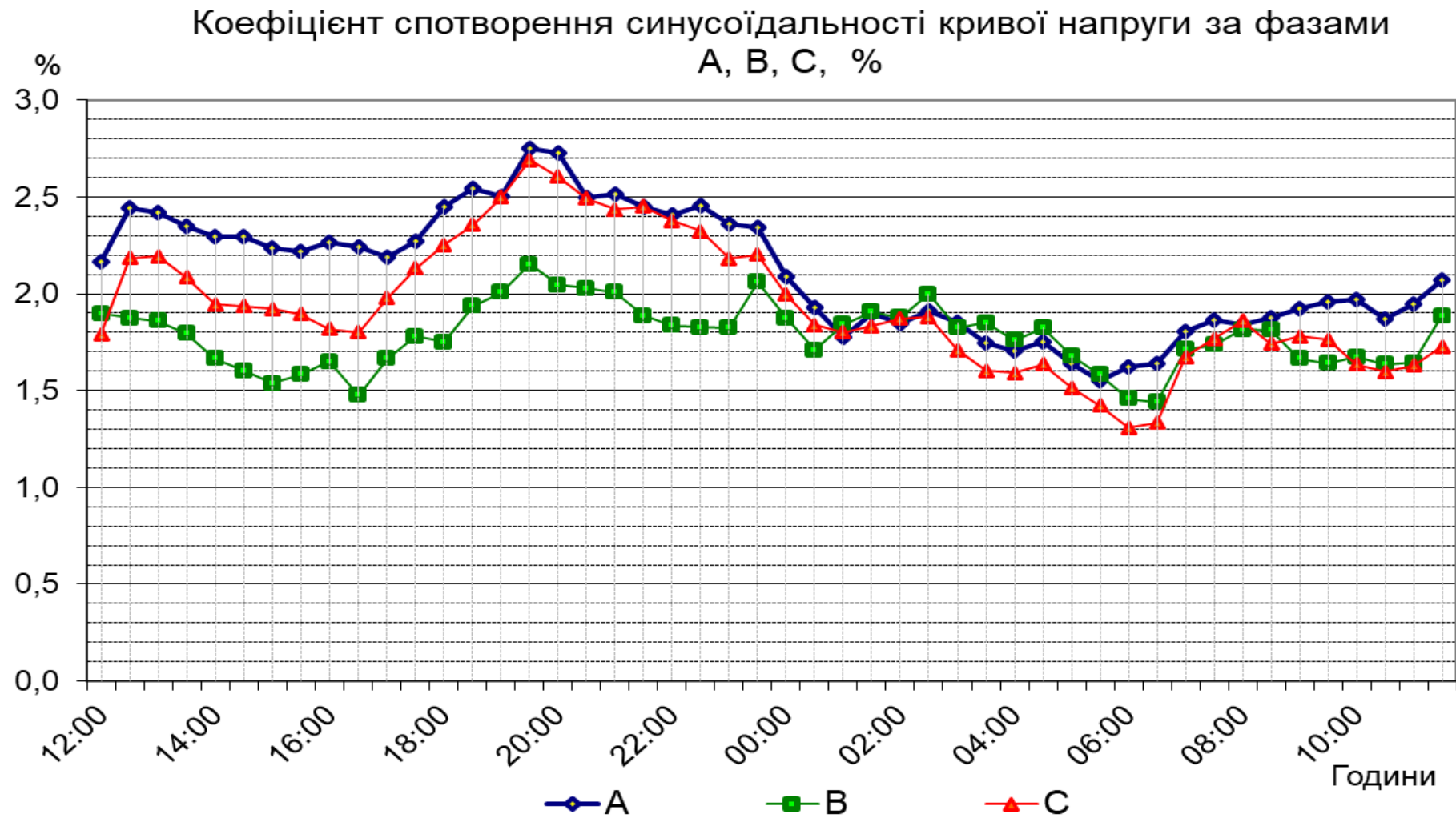


Рисунок 1.2 – Графік коефіцієнтів спотворення синусоїдальності кривої напруги в мережі 0,4 кВ

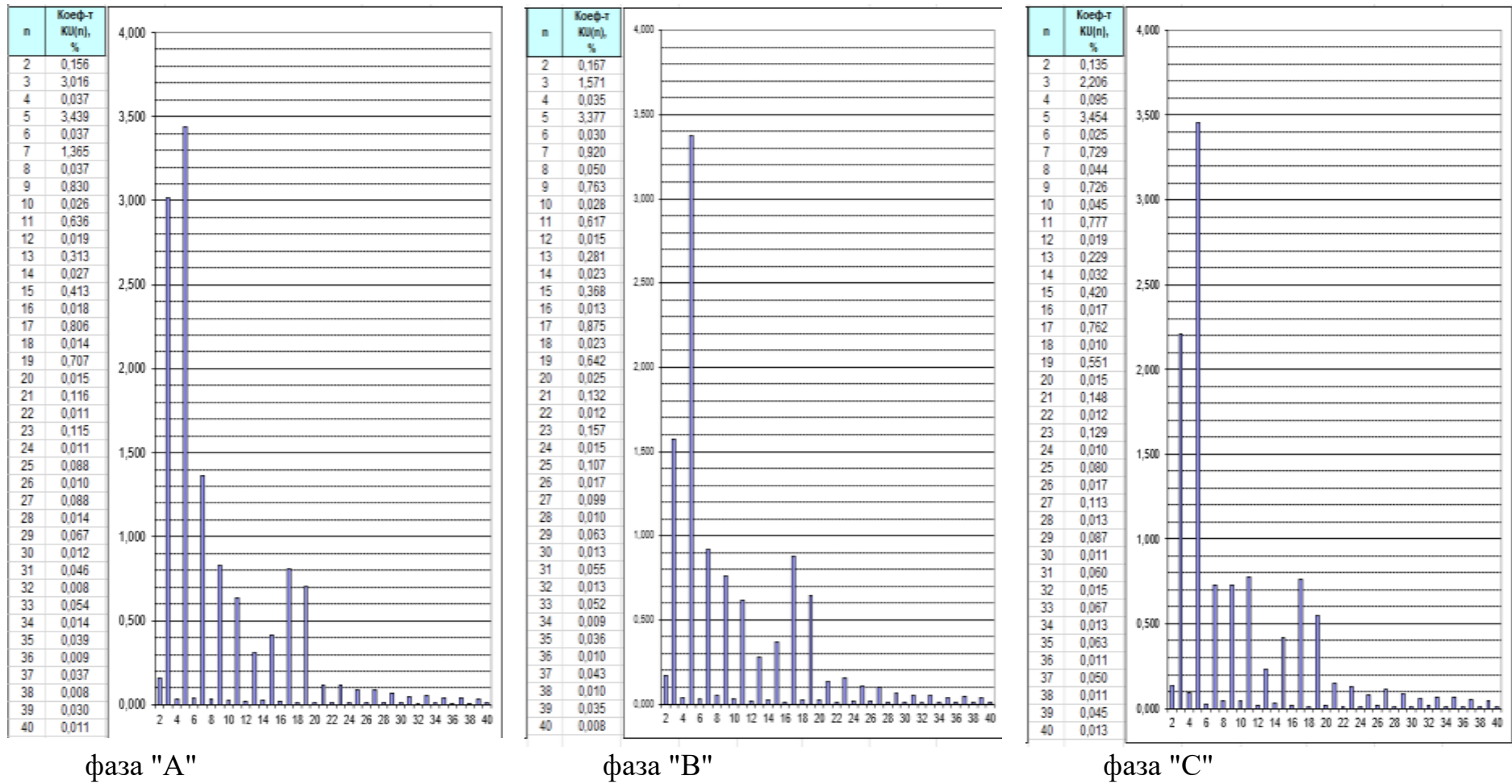


Рисунок 1.3 – Графік коефіцієнтів n-й гармонічної складової напруги в фазі "А", "В", "С" в мережі 0,4 кВ

Коефіцієнт n-й гармонічної складової напруги в фазах "А", "В", "С" в мережі 0,4 кВ за 24 години не відповідає нормам [7].

1.4 Причини виникнення гармонічної складової в електричній мережі

Наявності гармонічних коливань в електричній мережі було приділено належну увагу. Питаннями підвищення якості електричної енергії в Україні займалися такі вчені як: Жежеленко І. В., Шидловский А.К., Розанов Ю. К., Гриб О.Г., Сендерович Г.А., Барский В.А. [19, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43].

Саме наявність гармонічних коливань і є тим чинником, що призводить до скорочення строків роботи електричного обладнання, підвищення втрат електричної енергії в мережах. Частота виявлення гармонічних коливань в електричній мережі зростає з часом. Це пов'язано із різними факторами. Наприклад, із використанням сучасних потужних інверторів–перетворювачів, які використовуються для керування електричними двигунами, складним технологічним обладнанням, побутовим обладнанням (холодильники, кондиціонери, пральні машини і інше). Гармонічні збурення в електричній мережі розподіляються на проблеми миттєвої дії і проблеми тривалої дії (рис. 1.4) [9]:



Рисунок 1.4 – Гармонічні збурення в мережі в залежності від терміну дії

1.5 Проблеми обліку електричної енергії в мережі із наявністю гармонічних збурень

На точність приладів обліку впливають різні фактори, які зазначені в нормативному документі [44]. Серед них є фактори що пов'язані із гармонічними коливаннями:

- гармонічні складники у колах напруги та струму;
- постійний струм та парні гармоніки у колі змінного струму;
- непарні гармоніки у колі змінного струму;
- субгармоніки у колі змінного струму.

Наявність парних і непарних гармонік в колі змінного струму призводить до погіршення точності замірів електричних лічильників [45].

Висновки по розділу 1

У розділі проведено аналіз нормативної бази та наукових досліджень, присвячених показникам якості електричної енергії, зокрема гармонічним складовим напруги. Встановлено, що наявність вищих гармонік призводить до зниження точності приладів обліку, збільшення втрат електричної енергії, погіршення надійності електропостачання.

Проведено експериментальні дослідження показників якості електричної енергії в електричних мережах КП «Харківські теплові мережі». За результатами вимірювань підтверджено наявність гармонічних спотворень у всіх досліджених режимах роботи, причому найбільші значення зафіксовано для гармонік 3-го, 5-го, 7-го та 11-го порядків. Встановлено, що коефіцієнти окремих гармонічних складових напруги не відповідають вимогам чинних нормативних документів.

Виконаний аналіз причин виникнення гармонічних спотворень показав, що їх поява обумовлена широким використанням нелінійних електроприймачів, силових перетворювачів та інших сучасних електротехнічних пристроїв.

Показано, що гармонічні складові негативно впливають не лише на технічний стан електрообладнання, а й на достовірність обліку електричної енергії.

Отримані результати підтверджують актуальність обраної теми роботи, що дозволило сформулювати мету та визначити шість завдань дослідження, розв'язанню яких присвячено наступні розділи роботи.

РОЗДІЛ 2 ПРИЛАДИ ОБЛІКУ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

2.1 Загальна класифікація приладів обліку електричної енергії

Облік спожитої електричної енергії в електричних мережах здійснюється за допомогою приладів обліку електричної енергії. Незважаючи на широке застосування, ці прилади є складними технічними засобами з високою вартістю. Різноманітність вимог до вимірюваних параметрів обумовлює існування різних типів лічильників за рівнями напруги, кількістю фаз, видами вимірюваної енергії, принципами роботи, а також класами точності.

Класифікація приладів обліку електричної енергії створена на аналізі літератури, представлена на рис. 2.1.

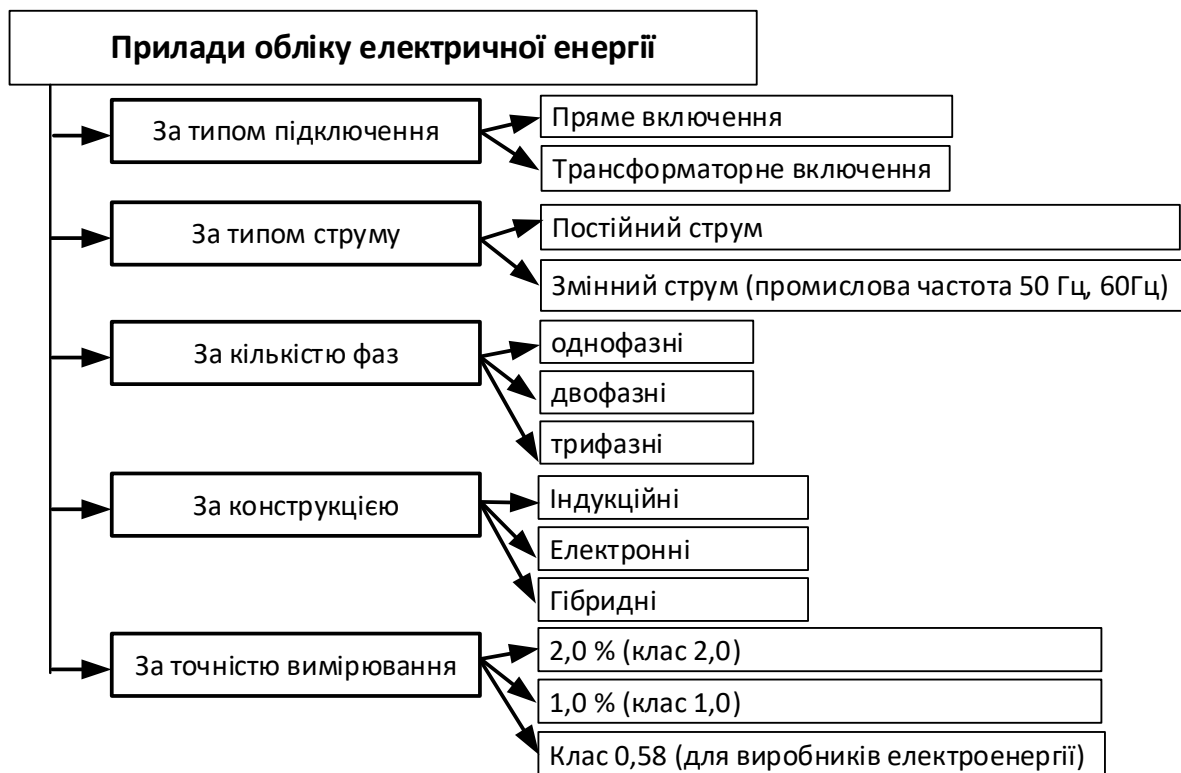


Рисунок 2.1 – Загальна класифікація приладів обліку електричної енергії

Лічильники *за типом підключення* можуть мати можливість безпосередньо вимірювати спожиту енергію в силовому ланцюгу, або під'єднуватися через трансформаторне підключення.

Розподіл лічильників за конструкцією:

Індукційні лічильники. Схематична будова індукційного електромеханічного лічильника представлена на рисунку 2.2 [47]. Лічильник складається з котушки напруги (Pressure coil), струмової котушки (Current coil), електромагніти яких розташовані під кутом 90 градусів відносно один одного у просторі. У проміжку між цими електромагнітами знаходиться алюмінієвий диск (Disk). Обертання диска передаються до лічильного механізму за допомогою редуктора.

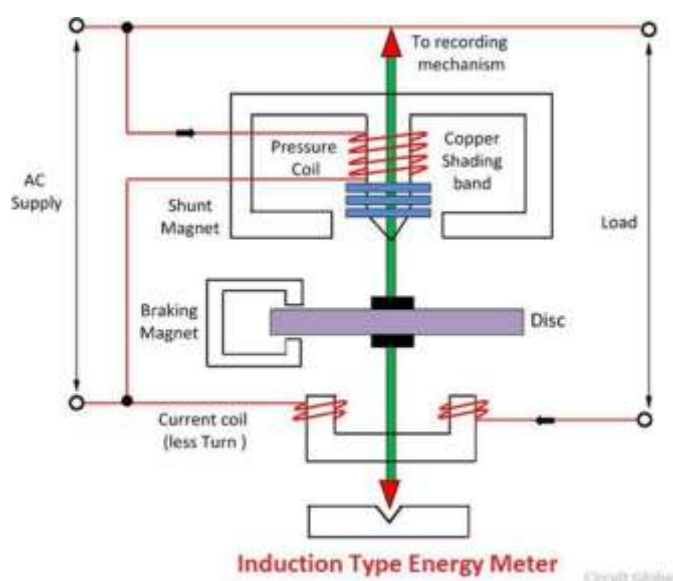


Рисунок 2.2 – Схематична будова індукційного електромеханічного лічильника електричної енергії

Принцип роботи індукційного лічильника добре описаний наприклад в [48].

Електронні лічильники електричної енергії. В електронному електролічильнику перетворювач перетворює вхідні аналогові сигнали з датчиків струму та напруги в цифровий імпульсний код. Наприклад, перетворює активну потужність в частоту проходження імпульсів. Загальна кількість

імпульсів прямо пропорційна споживаній електроенергії, яку підраховує мікроконтролер.

Гібридні лічильники електроенергії – рідко використовуваний проміжний варіант із цифровим інтерфейсом, вимірювальною частиною індукційного або електронного типу, механічним обчислювальним пристроєм.

Опис і принцип роботи гібридного електромеханічного електrolічильника. Принципова електрична схема гібридного лічильника представлена на рис. 2.3 [49].

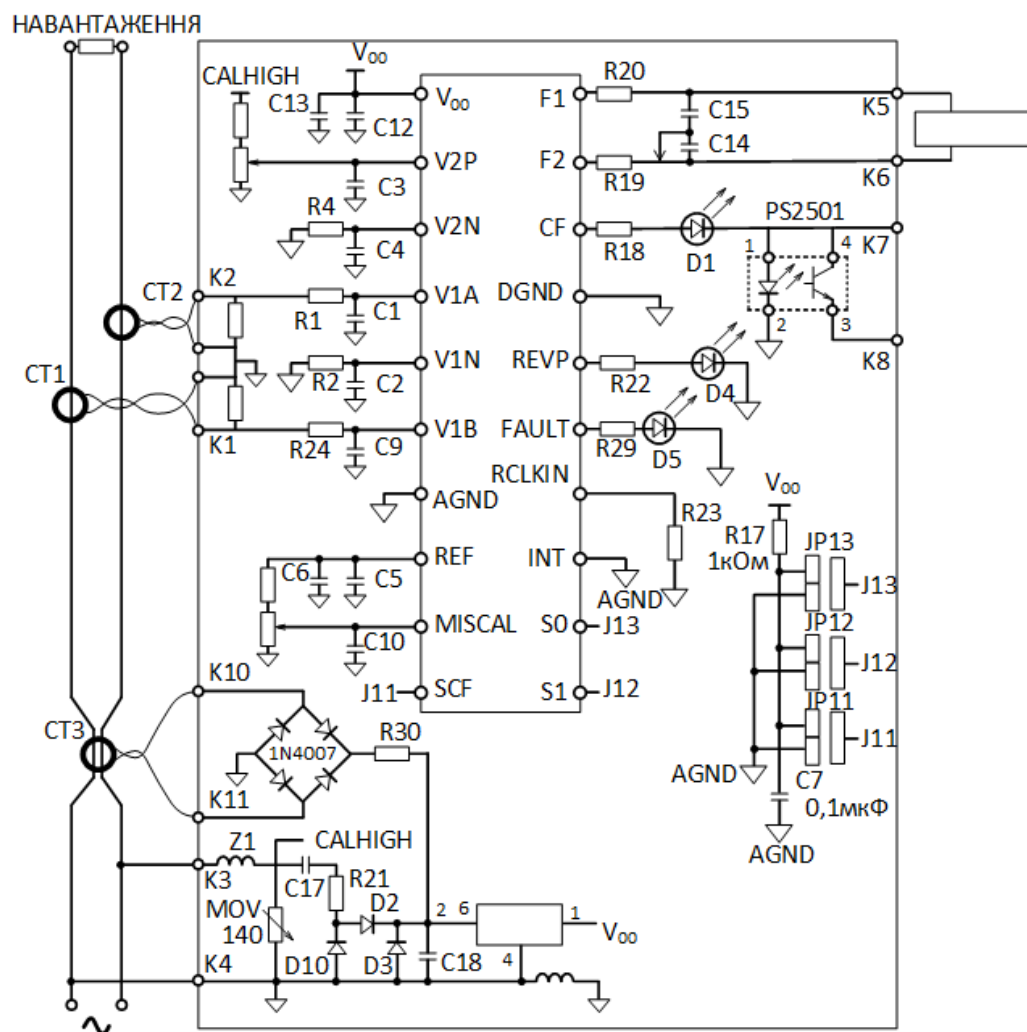


Рисунок 2.3 – Принципіальна схема гібридного електромеханічного електrolічильника

Схема лічильника вимірює струм, який споживається навантаженням, з допомогою трансформатора струму (датчика), через який протікає вимірюваний

струм. Лічильник складається з мікросхеми обробки, трьох трансформаторів струму, ланцюгів живлення, електромеханічного рахункового пристрою і додаткових ланцюгів. В якості регістратора електроенергії використовується простий електромеханічний відліковий пристрій, в якому застосовано двофазний кроковий двигун. Електроживлення лічильника забезпечує джерело живлення яке побудоване на трансформаторі струму і двополуперіодному випрямлячі.

Точність вимірювань лічильниками електричної енергії

В нормативах регламентується точність приладів обліку (0,5; 1; 2) [44].

Клас точності - це можлива погрішність приладу обліку в діапазоні вимірів, виражена у відсотках (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Класи точності приладів обліку електричної енергії

Вимоги до точності	Діапазон і умови застосування
1% (клас 1.0)	Мережі з напругою менш 0,4 кВ. (крім громадян)
2% (клас 2.0)	Мережі з напругою менш 0,4 кВ. (для громадян-споживачів)
2% (клас 2.0) 1% (клас 1.0) клас 0,58	Споживачі з потужністю встановлених пристроїв більш 750 кВт При заміні лічильника класу 2.0 і для мереж з напругою від 6 до 35 кВ для мереж з напругою понад 110 кВ
Клас 0,58	Виробники електричної енергії

2.2 Будова електронного лічильника електроенергії

Електронні лічильники становлять майже 100% всіх вироблених зараз лічильників. Важливою перевагою цих лічильників є можливість обліку електроенергії по диференційованих тарифах. Лічильники даного мають можливість запам'ятовувати результати вимірювань, відповідно є можливість відображати записані в пам'ять показання. Електронні електролічильники не мають рухомих частин тому вони більш довговічні, і мають більший міжповірочний період (4-16 років), мають низький поріг чутливості, більш високу точність вимірювання спожитої енергії.

2.2.1 Структурні схеми електронних лічильників

Структурні схеми електронного електролічильника представлені на рис. 2.4. а) за джерелом [50], а також на рис. 2.4. б) за джерелом [51].

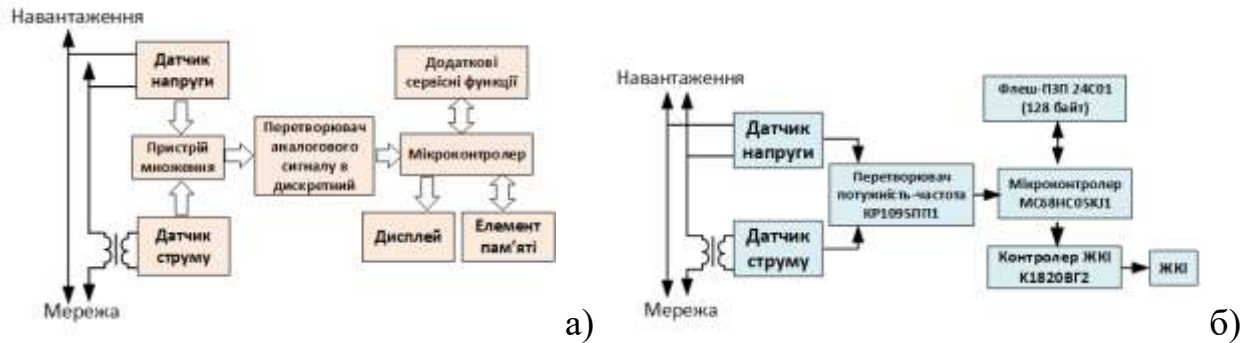


Рисунок 2.4 – Структурна схема електронного лічильника

Узагальнимо наведені структури електронних лічильників (рис. 2.5).

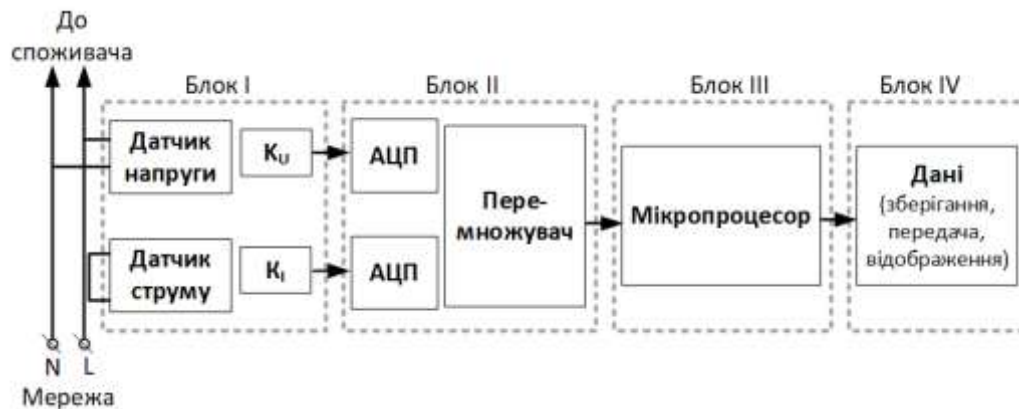


Рисунок 2.5 – Узагальнена структурна схема електронного лічильника

Опис структурної схеми електронного лічильника.

Блок I відповідає за отримання аналогової величини із датчиків струму і напруги. Саме за допомогою таких датчиків отримується складова вимірюваної величини в пропорційному аналоговому вимірі. Для всіх датчиків необхідно виконати умову – підготувати виміряні величини (підсилити або послабити їх до потрібних рівней) для сприйняття наступним блоком.

Блок II – переведення аналогової величини, що отримана із датчиків вимірювання (датчики струму і напруги) в дискретну величину. В цьому блоці також виконується перемноження цифрових значень величини струму і напруги для отримання вимірюваної величини – потужності.

Блок III – обробка виміряної цифрової величини в мікроконтролері або мікропроцесорі.

Блок IV – операції із отриманою величиною:

- відображення на екрані отриманої величини (потужність),
- передача визначеного результату до масиву зберігання, або в необхідний порт.

Роботу лічильника побудовано на такому алгоритмі:

- знімаються дані вимірювальних величин (напруги і струму);
- дані вимірювальних величин переводяться в частоту в спеціалізованій мікросхемі перетворювач потужність - частота;
- послідовність імпульсів надходить на процесор, який перетворює послідовні імпульси в значення потужності в цифровому вигляді. Отримана інформація надходить до різних сервісів (передача даних, зберігання, обробка).

Зрозуміло, що є і інші варіанти схемних рішень електронних приладів обліку, наприклад із таким алгоритмом:

- знімаються дані вимірювальних величин (напруги і струму);
- дані вимірювальних величин переводяться в цифрову форму за допомогою АЦП (аналога цифрового перетворювача);
- цифрові дані надходять на процесор, який перетворює, обробляє цифрові дані вимірюваних величин. (перемножує, сумує, зберігає)
- оброблені дані виводяться на дисплей, передаються на різні порти.

Але тим не менше все вимірювання електричних величин починається із знімання цих величин датчиками струму і напруги. На похибку електронних лічильників електроенергії впливають і похибки застосовуваних у них датчиків струму і напруги. Розглянемо будова датчиків струму і напруги.

2.2.2 Датчики напруги

Для фіксації напруги використовують різні за конструкцією і фізичним принципом датчики напруги. Класифікація основних датчиків напруги:

- резистивні дільники;
- трансформатори напруги;
- оптичні перетворювачі

Резистивні дільники. Найбільш поширений дільник напруги – це резисторний дільник. Лінійний дільник складається із декілька резисторів однакового супротиву $R_{01}=R_{02}=\dots=R_{10}$, на яких виникає падіння напруги (рис. 2.6 а). Падіння напруги відповідної величини і обирається, що становить напругу виходу дільника $U_{вих}$. Відношення вихідної напруги $U_{вих}$ до вхідної $U_{вх}$ визначає коефіцієнт ділення k .

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = k$$

Якщо потрібно мати дільник без регулювання коефіцієнту ділення, то приймають дільник із двома резисторами (рис. 2.6 б). Струм крізь дільник визначається як: $\frac{U_{вх}}{R_{\Sigma}} = I$.

Тоді напруга на виході дільника становитиме $U_{вих} = I * R_a$

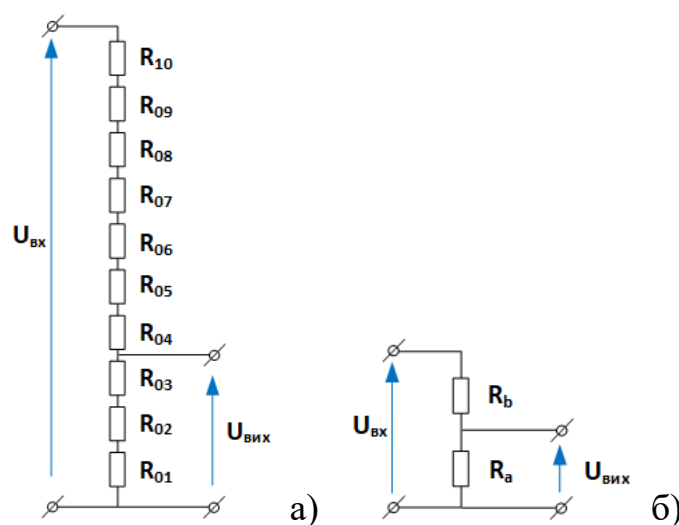


Рисунок 2.6 – Схема лінійного дільника напруги: а) декілька резисторів одного супротиву; б) два резистору різного супротиву

На рис. 2.6 показано класичний дільник, і він підходить для випадків, коли потрібна невелика точність дільника в десятинному форматі. Такий дільник дає точність один розряд. Похибка такого дільника залежить від точності резисторів, тому резистори мають бути відповідного класу точності. Підчас роботи, струм що проходить через дільник, підігріває резистори, тому резистори не повинні мати температурних дрейфів і інших вад. Точність дільника може обмежити точність приладу обліку електричної енергії. Якщо точність вимірювального приладу обумовлюється величиною 1% або 0,5%, то точність дільника має бути вищою.

Трансформатори напруги (англ. voltage transformer; VT) – вимірювальний трансформатор, у якому за нормальних умов використання вторинна напруга є пропорційною до первинної напруги та за умови правильного вмикання зміщена відносно неї за фазою на кут, близький до нуля [52]. Принципова схема понижуючого трансформатора представлена на рис. 2.7

Понижуючі трансформатори можуть виконувати різні функції:

- зниження вимірювальної величини (напруги);
- захисту схеми від стрибків напруги;
- гальванічне розділення.

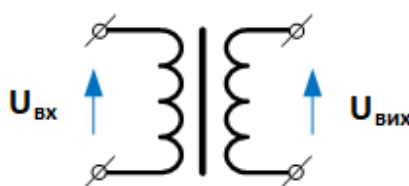


Рисунок 2.7 – Принципова схема понижуючого трансформатора

Коефіцієнт трансформації k визначається як відношення напруги на виході $U_{вих}$ до напруги на вході $U_{вх}$

$$\frac{U_{вих}}{U_{вх}} = k$$

Оптичні трансформатори напруги, принцип дії яких заснований на ефекті Поккельса, розробляються в даний час в Україні і за кордоном. Ідея

роботи трансформаторів напруги полягає на вимірюванні електричної величини за допомогою оптичного випромінювання. Трансформатор напруги працює за принципом, що величину повороту кута поляризації обумовлює напруженість електричного поля. В якості чутливого елемента використовується чарунка Поккельса. При проходженні лазерного поляризованого випромінювання крізь чарунку Поккельса, при наявності зовнішнього електричного поля E промінь лазера отримає поворот кута поляризації $\Delta\varphi$ у пропорції до величини електричного поля від провідника. Кут оберту поляризації $\Delta\varphi$ буде визначатися за формулою:

$$\Delta\varphi = \frac{\pi \cdot L \cdot K \cdot E}{\lambda} \quad (2.1)$$

де E – напруженість електричного поля; L – товщина пластини; λ – довжина хвилі; K – електрооптичні коефіцієнти. З формули (2.1) видно, що значення $\Delta\varphi$ залежить від величини прикладеного електричного поля.

Принцип роботи оптичного датчика напруги заснований на ефекті Поккельса – в оптичних середовищах при накладенні постійного або змінного електричного поля спостерігається подвійне променезаломлення, наприклад, у кристалічних п'єзoeлектриків [53, 54, 55]. На рисунку 2.8 показано принцип роботи волоконно-оптичних трансформаторів напруги.

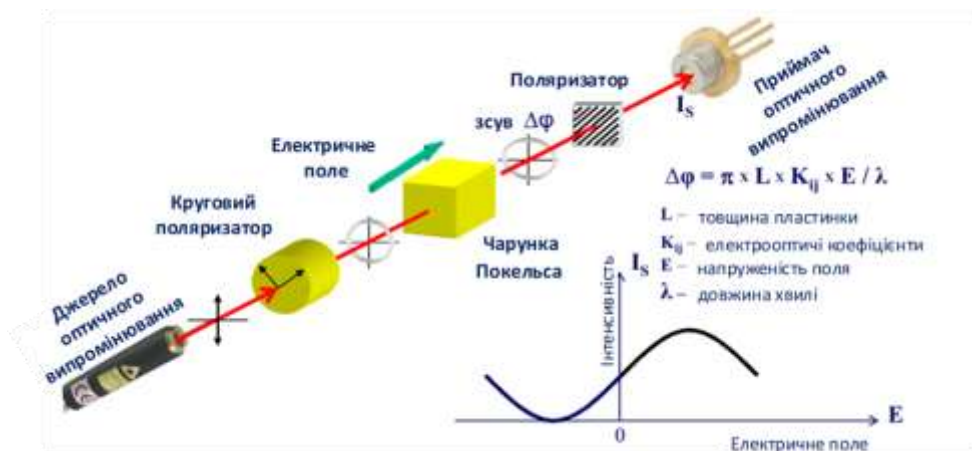


Рисунок 2.8 – Принцип роботи волоконно-оптичних трансформаторів напруги

На рисунку зліва на право: джерело оптичного випромінення, в якості такого джерела використовують лазер; оптичне випромінення проходить крізь поляризатор і поляризується в певній площині; потім оптичне випромінення вже поляризоване потрапляє в чарунку Поккельса; чарунка Поккельса під дією електричного поля змінює поляризацію світла і на виході вже маємо світлове випромінення із повернутою поляризацією; таким чином отримується кут повороту випромінення; за формулою (2.1) визначається напруженість електричного поля.

Оптичні трансформатори напруги не схильні до ферорезонансних явищ і дозволяють вимірювати напругу з досить високою точністю у всіх режимах роботи. Тим не менш вихідний сигнал оптичних трансформаторів напруги чутливий до впливу зовнішніх факторів, таких як: температура, вібрація, тиск, що негативно позначається на похибці вимірювань.

2.2.3 Датчики струму

Метрологічні вимоги до датчиків струму значно зросли із введенням ДСТУ EN 62053-22:2018 Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму. Спеціальні вимоги. Частина 22. Лічильники активної енергії статичні (класи точності 0,2 S та 0,5 S) (EN 62053-22:2003; A1:2017, IDT; IEC 62053-22:2003; A1:2016, IDT) і ДСТУ EN 50470-3:2022 Обладнання для вимірювання електроенергії. Частина 3. Особливі вимоги. Статичні лічильники активної енергії змінного струму (індекси класів A, B і C) (EN 50470-3:2022, IDT), ДСТУ 6100:2009 Лічильники активної електричної енергії змінного струму статичні. Тепер електронні лічильники необхідно також атестувати по додатковій погрішності, викликаній впливом постійної складової у струмовому ланцюзі лічильника; електромагнітної сумісності; температурному коефіцієнту лічильника на будь-якому інтервалі діапазону температур; довгочасної стабільності параметрів, а також по мінімальній вартості.

Датчики зняття величини струму можуть бути виконані за різними фізичними принципами:

- шунтуючий високоточний резистор із термостабільного сплаву;
- вимірювальний трансформатор струму;
- котушка Рогівського;
- оптичний датчик струму.

Шунтуючий резистор для визначення струму.

Шунт – пристосування, яке дозволяє електричному струму (або магнітному потоку) протікати в обхід будь-якої ділянки схеми.

Шунт є найпростішим вимірювальним перетворювачем струму в напругу. Вимірювальний шунт виконується у вигляді чотиризатискного резистора. Два вхідних затискача шунта, до яких підводиться струм I , називаються струмовими, а два вихідних затискача, з яких знімається напруга U , називаються потенційними.

До потенційних затискачів шунта зазвичай приєднують вимірювальний механізм вимірювального приладу.

Вимірювальний шунт характеризується номінальним значенням вхідного струму $I_{ном}$ і номінальним значенням вихідної напруги $U_{ном}$. Їх відношення визначає номінальний опір шунта (рис. 2.9) :

$$R_{ш} = \frac{U_{ном}}{I_{ном}}$$

Шунти застосовуються для розширення меж вимірювання струму, при цьому більшу частину вимірюваного струму пропускають через шунт, а меншу - через вимірювальний механізм.

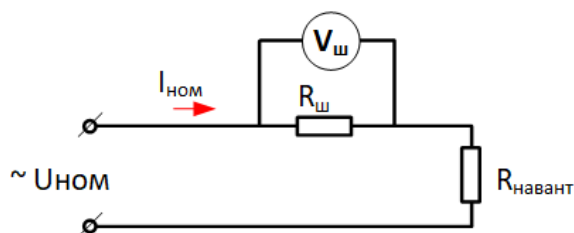


Рисунок 2.9 – Падіння напруги на вимірювальному шунті

Струм I_i протікає через вимірювальний механізм, пов'язаний з вимірюваним струмом I залежністю

$$I_i = I \frac{R_{ш}}{R_{ш} + R_i}$$

де R – опір вимірювального механізму.

Якщо необхідно, щоб струм I_i був у n разів менший за струм I , то опір шунту має бути:

$$R_{ш} = \frac{R_i}{n - 1}$$

де $n = \frac{I}{I_i}$ – коефіцієнт шунтування.

Шунти виготовляють із манганіну. Якщо шунт розрахований на невеликий струм (до 30 А), його зазвичай вбудовують у корпус приладу (внутрішні шунти). Для вимірювання великих струмів використовують прилади із зовнішніми шунтами. У цьому випадку потужність, що розсіюється в шунті, не нагріває прилад.

Для переносних магнітоелектричних приладів на струми до 30 А внутрішні шунти можуть виготовляти на кілька меж вимірювання. В такому випадку шунт має переключення на різні номінали струму.

При використанні шунтів з вимірювальними приладами на змінному струмі виникає додаткова похибка від зміни частоти, оскільки опір шунта і опір вимірювального механізму по різному залежить від частоти.

Шунти поділяються на класи точності 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 та 0,5. Число, що визначає клас точності, означає допустиме відхилення опору шунта у відсотках його номінального значення [56].

Вимірювальні трансформатори струму.

Самі масові й широко розповсюджені датчики струму - трансформатори струму [57]. Вимірювальний трансформатор струму – трансформатор, який призначений для перетворення струму до значення, зручного для проведення вимірювань. Первинна обмотка трансформатора струму включається послідовно

у коло зі змінним струмом, що вимірюється. А у вторинну вмикаються вимірювальні прилади. Струм, що протікає по вторинній обмотці трансформатора струму, пропорційний струму, що протікає у його первинній обмотці. У якості сердечників трансформаторів струму використовуються нанокристалічні або аморфні сплави. Нанокристалічні сплави характеризуються практично постійною високою магнітною проникністю в слабких полях (до 0.1 А/м).

Трансформатори струму застосовуються для:

- зниження струму до стандартних вимірюваних значень (5 А або 1 А);
- передачі сигналів у вторинні ланцюги приладів обліку та захисту;
- забезпечення відповідності комерційного обліку електроенергії.

Для лічильників обов'язковими є класи точності 0,5 або 0,5s відповідно до ДСТУ EN 61869-2 та ІЕС 60044-1. Клас 0.5s гарантує точність навіть при малих навантаженнях, що важливо для офісних будівель і підприємств з нерівномірним споживанням.

Клас точності характеризує допустиму похибку за струмом у відсотках при номінальних умовах: $z_2 = z_{2\text{ном}}$. Номінальний клас точності трансформатора струму – це клас точності, що гарантується трансформатору струму при номінальному вторинному навантаженні і вказаний на його паспортній табличці.

Для трансформаторів струму встановлюються такі класи точності: 0,1; 0,2; 0,2S; 0,5; 0,5S; 1; 3; 5; 10; 5P; 10P. Згідно з міжнародним стандартом ІЕС 60044-01 трансформатори струму повинні знаходитися в класі точності при протіканні по первинній його обмотці струму $0,2 \div 200\%$ номінального, що зазвичай досягається виготовленням сердечника з нанокристалічних сплавів [58].

Недоліками трансформаторів струму є висока вартість, складність конструкції, втрата точності при низьких навантаженнях та чутливість до зовнішніх факторів, таких як перевантаження та короткі замикання. Вони також мають обмеження за напругою і потребують регулярного технічного обслуговування для запобігання несправностям [59].

Котушки Рогівського

У котушках Рогівського використовуються ті самі принципи роботи, що у традиційних трансформаторах струму (ТС) з металевим сердечником. Основна відмінність полягає в тому, що намотування котушки Рогівського здійснюється на немагнітний сердечник, результатом чого є лінійність характеристики, оскільки сердечник не насичується. Однак, на відміну від традиційних ТС, вторинний струм яких пропорційний первинному струму. Вихідна напруга котушок Рогівського є масштабованою похідною за часом $di(t)/dt$ первинного струму. Для пристроїв захисту, які використовують у роботі аналогові значення промислової частоти, необхідна додаткова обробка вхідного сигналу від датчиків струму, а мікропроцесорне обладнання повинно мати конструктивну можливість приймати такі сигнали.

Конструктивно обмотки високоточних котушок Рогівського виконані у вигляді багатопарових друкованих плат із немагнітного матеріалу. З цієї причини взаємна індукція між первинною та вторинною обмотками дуже мала, і на вимірювання можуть вплинути зовнішні електромагнітні поля.

Котушки Рогівського мають два конструктивних виконання: із замкнутим сердечником і з розімкненим сердечником. Розімкнений сердечник дозволяє встановлювати котушки без розмикання головних ланцюгів. Такі типи також підходять для встановлення на кілька дротів, або для встановлення на шини великого перерізу.

Особливості котушок Рогівського:

- фазовий кут між вторинною напругою та первинним струмом становить 90° ;
- котушки Рогівського є частотно-залежними пристроями. Вони посилюють вищі частоти з лінійною залежністю між вихідним сигналом котушки і частотою, викликаючи посилення гармонік по гармонічному порядку.

Оптичний датчик струму

Робота оптоелектронних трансформаторів струму заснована на ефекті Фарадея, що полягає в зміні поляризації світлового потоку в оптично активній речовині під дією зовнішнього магнітного поля [60, 61, 62, 63, 64, 65]. Індукцію магнітного поля чи силу струму визначають шляхом виміру кута повороту площини поляризації світла. Однак реалізація електронно-оптичної схеми вимірювання струму на основі ефекту Фарадея може відрізнятися у різних фірм-виробників – це є інженерним ноу-хау.

Загальний принцип дії оптичного датчика струму за ефектом Фарадея, представлено на рис. 2.10.

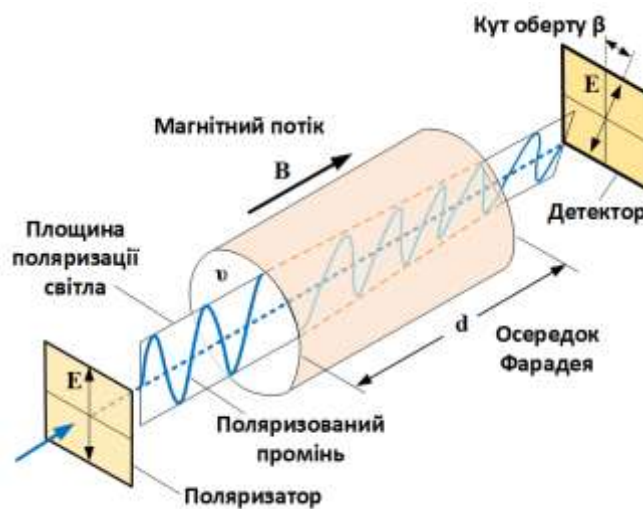


Рисунок 2.10 – Принцип дії оптичного датчика струму [66]

На рисунку 2.10 зліва на право: синя стрілочка напрямлення світла від джерела; світло проходить перший поляризатор із заздалегідь визначеною поляризацією, (на рисунку 2.10 це вертикальна поляризація); далі показана площина поляризації світла і схематичне зображення оптичної електромагнітної хвилі із коливаннями в вертикальній площині; поляризоване світло входить в осередок Фарадея із довжиною d ; на осередок Фарадея впливає магнітний потік B ; під дією магнітного потоку осередок Фарадея зсуває (повертає) поляризацію світла; світло виходить із осередка Фарадея і попадає на приймач, проходячи крізь поляризатор детектора; повертаючи поляризатор детектора на кут β можна

досягти максимального світлового потоку, що свідчить, що світловий промінь і поляризатор детектора мають однакові напрямлення поляризації; кут повороту поляризації β в осередку Фарадея пропорційний величині дії магнітного потоку B ; в свою чергу магнітний потік B має пряму залежність від величини струму I , що проходить по струмопроводу (електричному проводу). Таким чином визначивши залежність від кута β величини магнітного потоку B , можна визначати струм I , що проходить по струмопроводу. В [66] доведено лінійність такої залежності в широкому діапазоні величин магнітного потоку B , а відповідно і струму I .

2.2.4 Перетворювачі аналогової величини в дискретну

Після отримання вимірної величини від датчиків струму і напруги, виконується перетворення аналогової величини в дискретну. Це перетворення виконують прилади аналого-цифрового перетворення (АЦП).

Функцію аналого-цифрового перетворення виконують спеціалізовані мікроконтролери, що містять перетворювачі потужності в частоту. Вони здатні перемножувати сигнали й представляти отриману величину в зручній для мікроконтролера формі. При цьому точність перетворення в широкому діапазоні струмів може бути в межах декількох сотих часток відсотка. Загальне число імпульсів, підраховуване мікроконтролером, прямо пропорційно споживаній електроенергії.

Приклади перетворювачів потужність-частоти.

Перетворювач потужність-частота на мікросхемі КР1095ПП1 [67], структурна схема представлена на рис. 2.11.

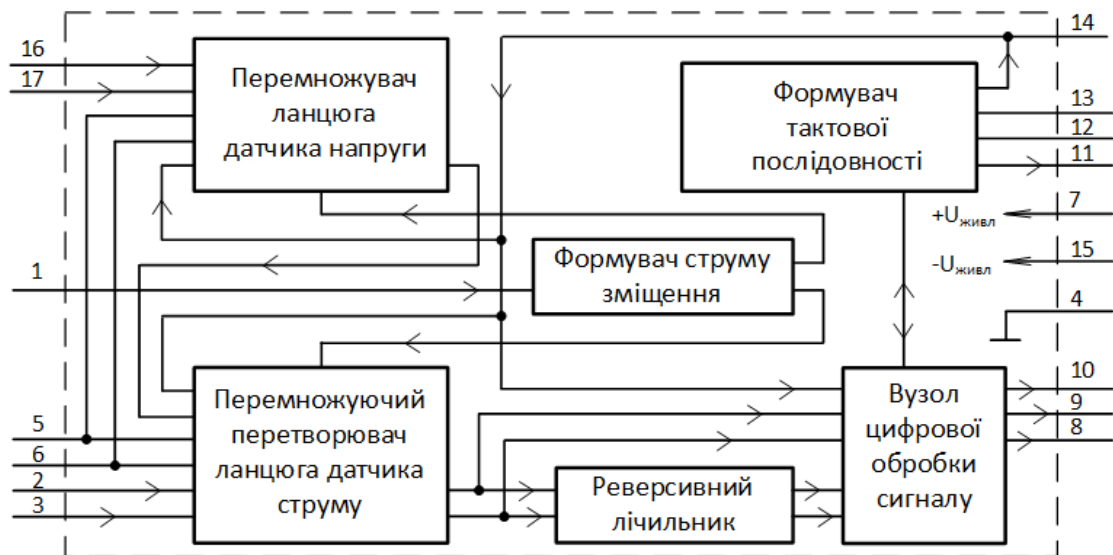


Рисунок 2.11 – Структура внутрішнього устрою мікросхеми КР1095ПП1

Перетворювач потужність-частота на мікросхемі ADE7755 (Energy Metering IC with Pulse Output) [68]. Структурна схема представлена на рис. 2.12

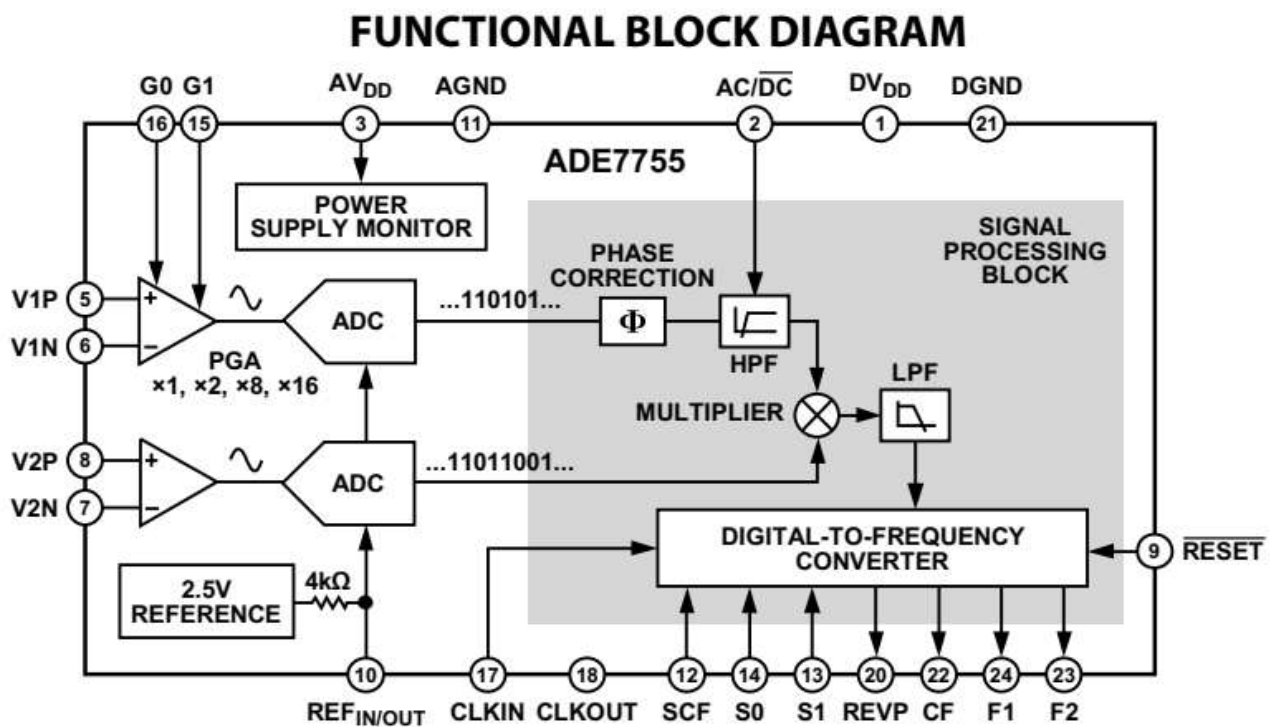


Рисунок 2.12 – Внутрішня будова мікросхеми AD7755 (лічильник електроенергії з імпульсним виходом)

2.2.5 Схеми електронних приладів обліку

Самих схем електронних лічильників майже немає в мережі. Але є приклад розробки електронного лічильника [69]. В публікації [69] наведено аналіз схеми електронного лічильника на прикладі схеми лічильника на мікроконтролері Motorola. Блок схема пристрою показана на рисунку 2.4.

Схема цифрового обчислювача показана на рис. 2.13 [69]. На представленій схемі реалізовані всі мінімально необхідні функції. Пристрій базується на використанні інтегральної схеми (ІС) перетворювача потужності в частоту імпульсів КР1095ПП1. і 8-розрядного мікроконтролера МС68НС05КJ1 (рис. 2.13). В схемі використано мікроконтролер МС68НС05КJ1 який обслуговує дані, він сумує кількість імпульсів, передає дані в порт дисплея і додатково здійснює блокування при різних ненормальних режимах.

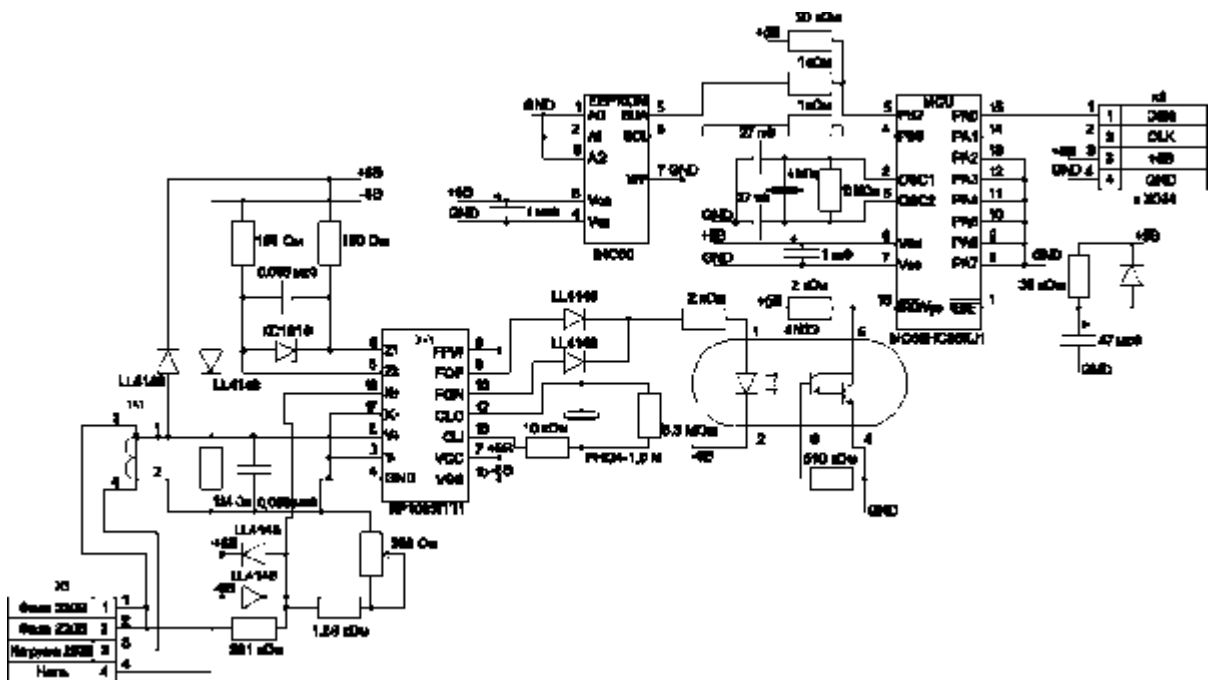


Рисунок 2.13 – Принципова схема цифрового лічильника на перетворювачі КР1095ПП1

Величини струму і напруги знімаються датчиками і переводяться в сигнали, що пропорційні струму і напрузі, і подаються на вхід перетворювача

KP1095ПП1. Перетворювач перемножує отримані сигнали, таким чином вираховується миттєва потужність. Потужність перетворюється в частоту імпульсів, яку і обробляє мікроконтролер. Схема не має захисту від збоїв по напрузі живлення, для зменшення похибок і для збереження даних вимірювання використовують EEPROM.

Є схемне рішення приладу обліку гібридного типу на мікросхемі AD7755, що представлена на рис. 2.14 [70].

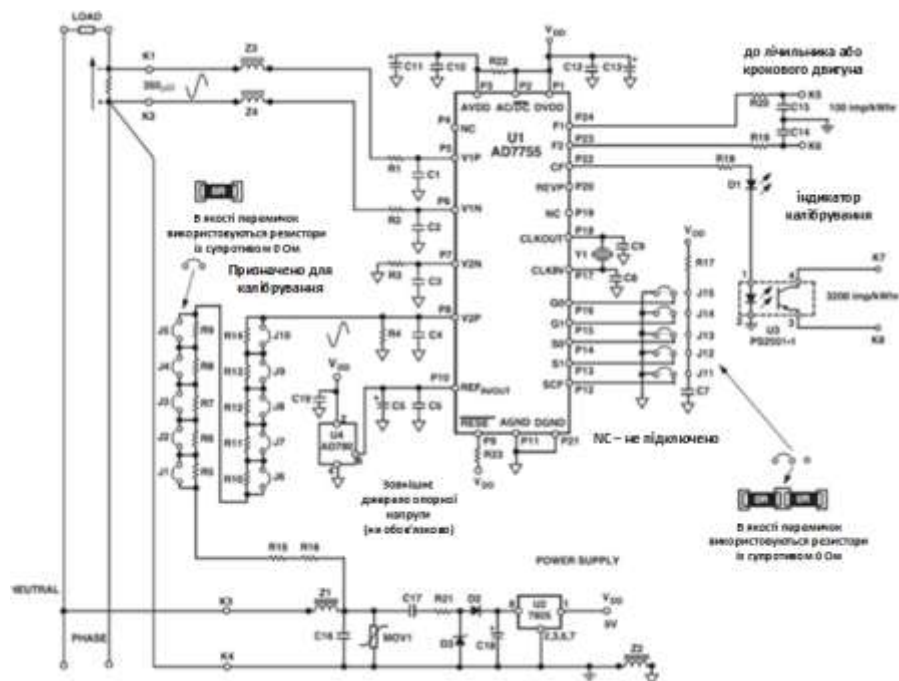


Рисунок 2.14 – Прилад обліку гібридного типу на мікросхемі AD7755

Електронні прилади обліку відрізняє наявність більшої кількості сервісних функцій, таких як дистанційний доступ до інформації про витрачену енергію й ін. Наявність цифрового дисплея, керованого від мікроконтролера, дозволяє програмно встановлювати різні режими виводу інформації, наприклад, виводити інформацію про спожиту за заданий період енергію по різних тарифах і т.д.

2.3 Прилади обліку підприємства

На підприємстві використовують прилади обліку електричної енергії різних класів точності різних систем. Здебільшого це прилади для технічного обліку електричної енергії. Але після того, як були встановлені комплекси когенерації, то для них були обладнані вже більш сучасні електронні прилади обліку.

Так на підприємстві експлуатуються електролічильники GAMA 3XX серії. За даними виробника такі лічильники мають наступні параметри:

Лічильник GAMA 300 вимірює активну і реактивну електроенергію, підключається у трифазні мережі з перемінним струмом. Лічильник GAMA 300 реєструє профілі навантажень, максимуми потужності, договірні ліміти потужності.

За допомогою вбудованих інтерфейсів можливе використання електролічильника в автоматизованих системах обліку електроенергії АСКОЕ (комерційний облік), АСТУЕ (технічний облік) і ЛОСОД - систему збору та обробки даних.

2.4 Стенд для перевірки діапазонів роботи приладів обліку електричної енергії

Заходи із зменшення впливу гармонічної складової на прилади обліку можуть бути застосовані тільки у випадку аналізу схемних рішень приладів обліку. Але виробники сучасних приладів обліку не надають схеми своїх приладів. Тільки запевняють про відповідність вимогам [44]. Для визначення чутливості приладів обліку до різних гармонік в струмі мережі було запропоновано розробку стенду для проведення такої перевірки

Мета створення стенду: Перевірка лічильників електричної енергії на працездатність за наявності гармонічних складових у мережі; отримання кількісної оцінки впливу різних значень сумарного коефіцієнта гармонічних

спотворень (Total Harmonic Distortion, THD) струму на показання приладів обліку потужності.

Задача розробки стенду: Стенд призначений для відтворення режимів роботи приладів обліку електричної енергії в електричній мережі. Передбачено регулювання активного навантаження в межах до 1 кВт відповідно до нормативних вимог щодо якості електричної енергії. Також забезпечується формування гармонічних складових до 40-ї гармоніки включно з можливістю регулювання їх амплітуди до 10 % від амплітуди основної складової. Стенд дозволяє моделювати гармонічні спотворення як у напрузі, так і в струмі.

Розробка стенда було виконана за наступними кроками:

- створено структурну схему стенда;
- складено спрощену електричну принципову схему стенда;
- промодельовано схему в програмі Simulink;
- складено електричну принципову схему стенда із відповідними параметрами елементів, за результатами моделювання в Simulink;
- зібрано стенд для перевірки діапазонів роботи приладів обліку електричної енергії;
- на стенді проведено заміри параметрів роботи приладів обліку електричної енергії в мережі при наявності гармонік.

2.4.1 Структурна схема стенду

На першому етапі проектування стенду було створено структурну схему стенда, яка представлена на рис. 2.15.

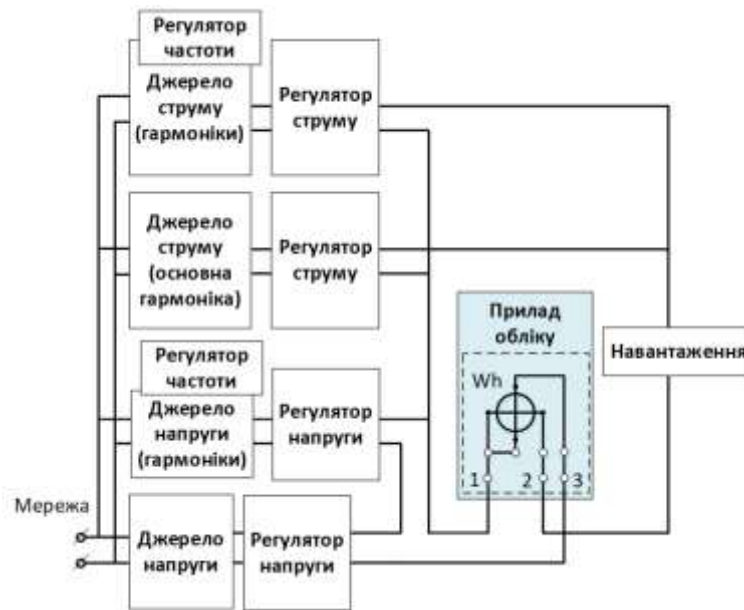


Рисунок 2.15 – Структурна схема стенду

За структурною схемою розроблено спрощену схему електричну принципову стенда перевірки приладів обліку (рис. 2.16)

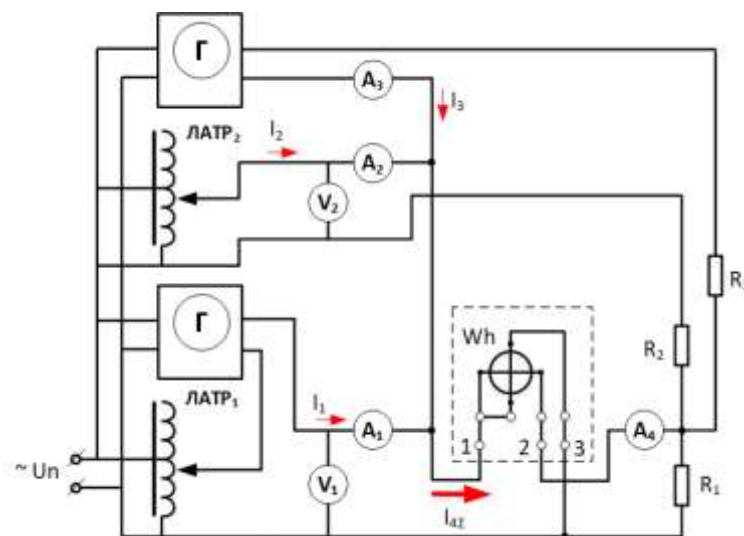


Рисунок 2.16 – Спрощена схема електрична принципова, стенда перевірки приладів обліку

Схема була промодельована в програмі Simulink (рис. 2.17)

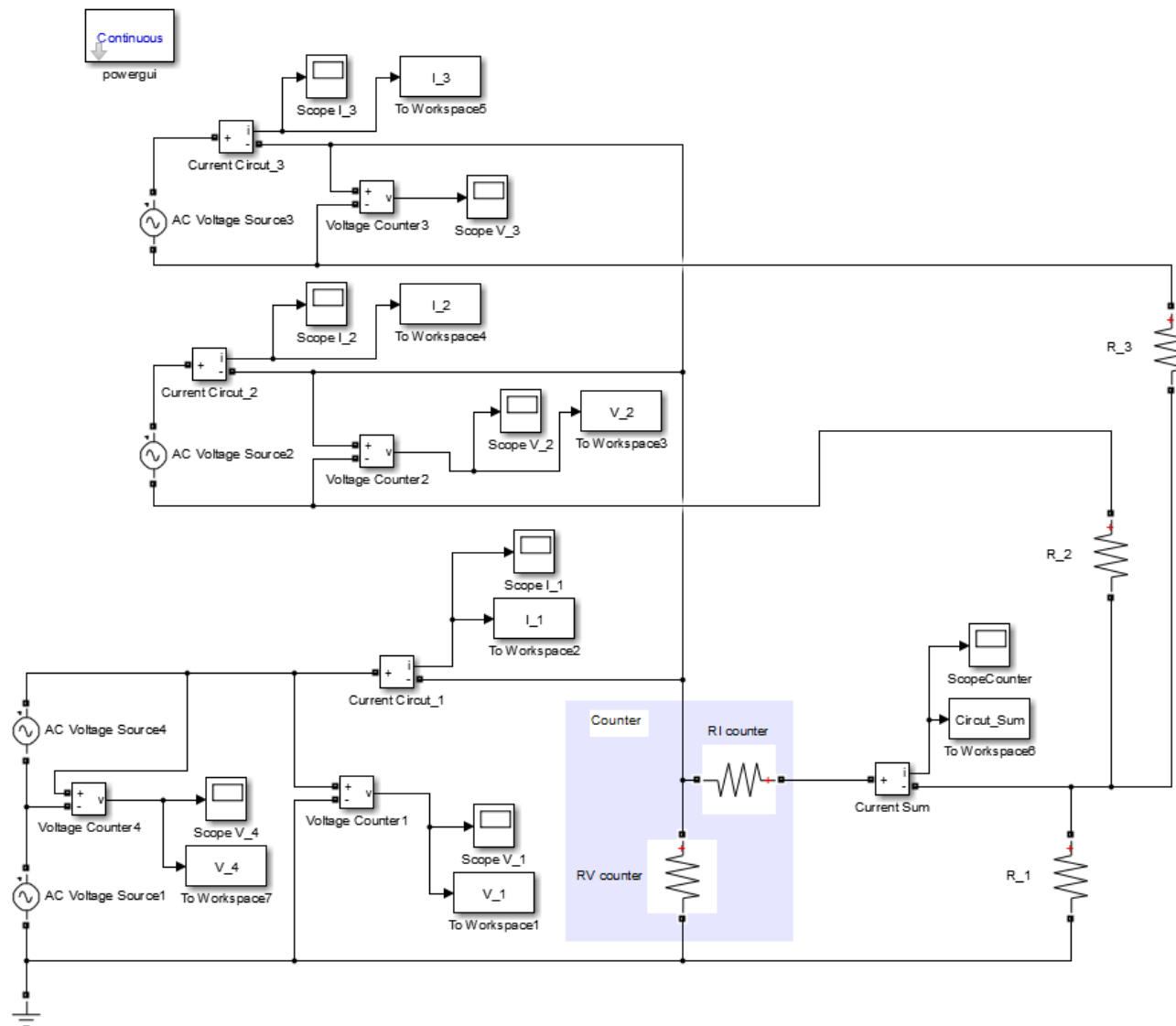


Рисунок 2.17 – Модель стенду в програмі Simulink

Де **powergui** – обов’язковий елемент аналізу.

AC Voltage Source1, AC Voltage Source2, AC Voltage Source3, AC Voltage Source4 – джерела напруги.

R_1, R_2, R_3 (Series RLC Branch) – активне навантаження.

Voltage Counter1, Voltage Counter2, Voltage Counter3, Voltage Counter4 (Voltage Measurement) – датчики вимірювання напруги.

Current Circuit1, Current Circuit2, Current Circuit3 (Current Measurement) – датчики вимірювання струму.

Scope I_1, Scope I_2, Scope I_3, ScopeCounter, Scope V_1, Scope V_2, Scope V_3, Scope V_4 – прилади вимірювання, осцилографи.

Модель приладу обліку Counter складається із двох супротивів, супротиву струмового датчика RI counter, супротиву датчика напруги RU counter.

To Workspace1, To Workspace2, To Workspace3, To Workspace1, To Workspace2, To Workspace6, To Workspace6 – модулі передачі даних до підпрограм розрахунків, нам необхідні були розрахунки для проведення аналізу за розкладанням Фур’є.

На моделі було випробувано відповідність всіх вимог до розробляємої схеми. Отримані осцилограми на приладі обліку (**Counter**), підтверджують відповідність розробленої схеми початковому завданню.

Осцилограми першого кола струму, яке задає напругу на датчику напруги приладу обліку (рис. 2.18). На осцилограмі RMS (Root Mean Square) відповідає середньоквадратичному значенню величин. Напруга задана 230 В (діюче значення 230 В, амплітудне значення 325,3 В), струм в цьому колі становить 0,0223 А (діюче значення 0,0115 А, амплітудне значення 0,0163 А). Частота напруги відповідає частоті мережі 50 Гц. Загальна потужність, що проходить через прилад обліку в такому випадку, становитиме:

$$\bar{P}_W = \bar{U}_W \cdot \bar{I}_W = 230 \cdot 0,012 = 0,0026 \text{ кВт}$$

Така потужність становить 0,3% від потужності, яка запланована для вимірювання. Тому впливом на показання приладу обліку нехтуємо (тому що така величина значно менша за точність приладу яка становить 1%).

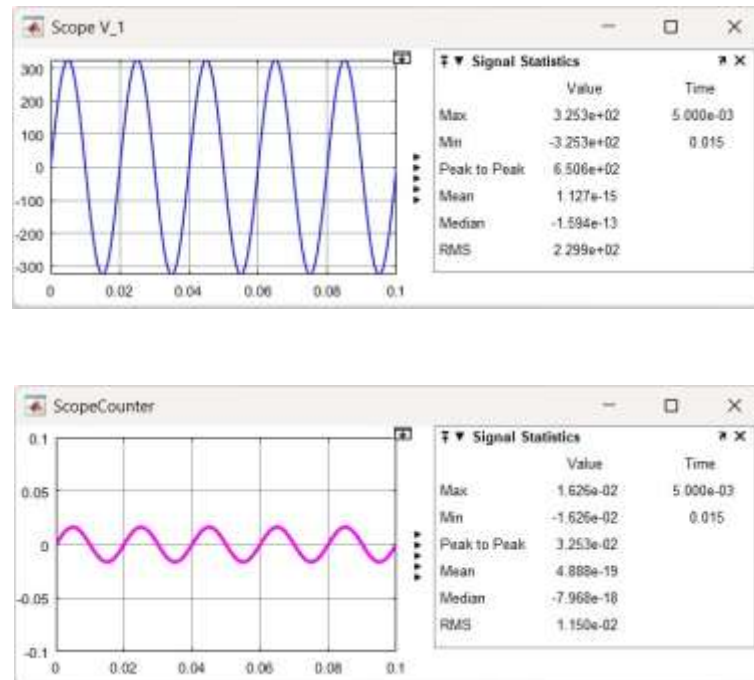


Рисунок 2.18 – Осцилограма напруги і струму першого кола схеми без гармонік

В першому колі стенда на вольтододатньому джерелі напруги (**AC Voltage Source4**) задається необхідна величина напруги і її частота. Величина обирається в залежності від умови по відношенню до номінальної напруги. Так, якщо номінальна напруга становить $U_n = 230 \text{ В}$, то величина напруги гармоніки може бути 0,1 від номінальної величини. І величина може задаватися в різних діапазонах (навіть до 1 від номінальної величини) в залежності від мети експерименту. В меню додаткового джерела напруги (**AC Voltage Source4**) задається необхідна величина напруги і її частота. В даному випадку для номінальної напруги $U_3 = 36 \text{ В}$ амплітудне значення напруги $u_3 = 50,9 \text{ В}$, $f_3 = 150 \text{ Гц}$.

В такому випадку середньоквадратичне значення напруги на приладі обліку становитиме $\bar{U} = 232,7 \text{ В}$ (рис. 2.19):

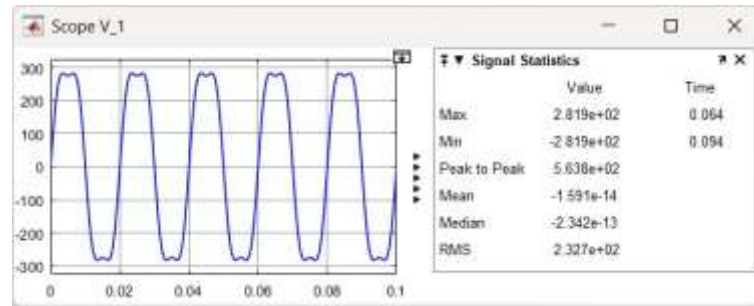


Рисунок 2.19 – Напруга на приладі обліку при наявності додаткової гармоніки в колі напруги ($f_3 = 150$ Гц)

В той же час струм через прилад обліку, який створить напруга тільки від джерел напруги **AC Voltage Source1** і **AC Voltage Source4**, становитиме $\bar{I}_W = 0,01164$ А (рис. 2.20)

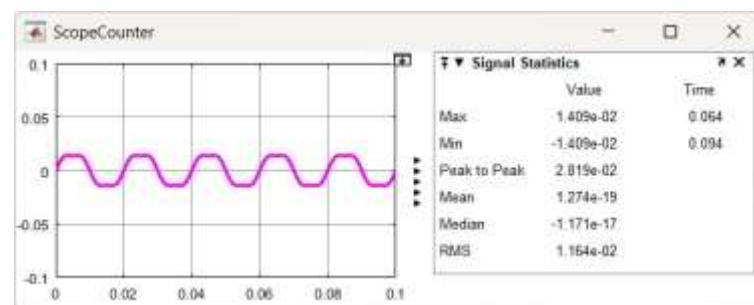


Рисунок 2.20 – Струм через прилад обліку, який створить напруга першого кола, тільки від джерел напруги **AC Voltage Source1** і **AC Voltage Source4**

Загальна потужність, що проходить через прилад обліку, становитиме:

$$\bar{P}_W = \bar{U}_W \cdot \bar{I}_W = 233 \cdot 0,01164 = 2,7 \text{ Вт}$$

Така потужність становить 0,3% від потужності яка запланована для вимірювання. Тому впливом на показання приладу обліку нехтуємо.

Осцилограми другого кола струму, яке задає величину струму на датчику струму приладу обліку (рис. 2.21). При заданій напрузі 21,8 В (діюче значення 21,76 В, амплітудне значення 30,77 В), струм в цьому колі становить 4,35 А (діюче значення 4,35 А, амплітудне значення 6,15 А). Частота напруги відповідає

частоті мережі 50 Гц. Загальна потужність, що проходить через прилад обліку в такому випадку, становитиме:

$$\bar{P}_W = \bar{U}_W \cdot \bar{I}_W = 230 \cdot 4,35 = 1 \text{ кВт}$$

Ця потужність і є такою, що задається для визначення показань приладу обліку.

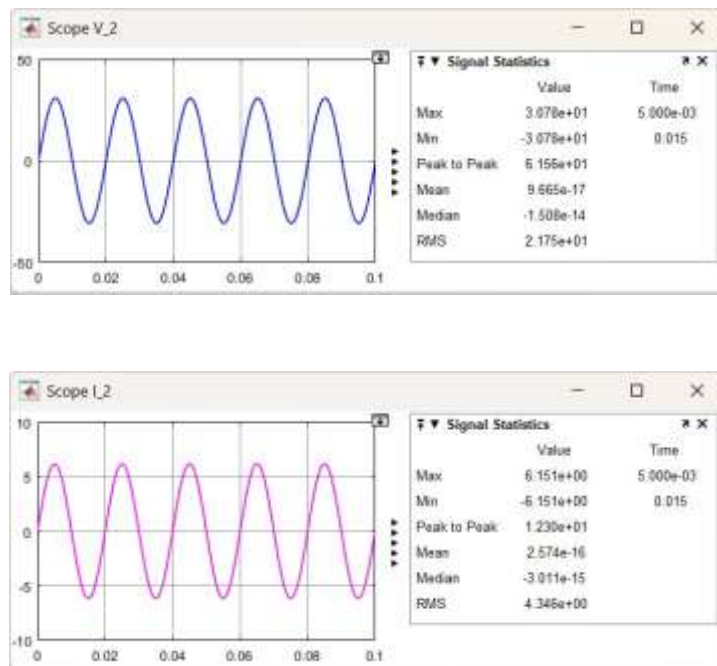


Рисунок 2.21 – Осцилограма напруги і струму другого кола схеми

В цьому випадку струм через прилад обліку із підключеним першим колом, яке задає величину напруги U , і другим колом, що задає величину струму I , буде дорівнювати $I=4,36 \text{ А}$ (рис. 2.22).

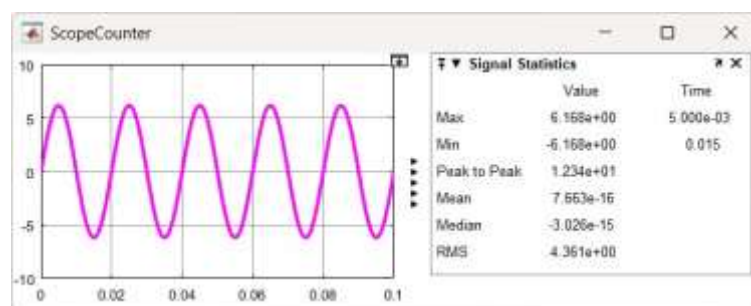


Рисунок 2.22 – Результуючий струм крізь прилад обліку при підключеному першому і другому колі стенду

Осцилограми третього кола струму, яке задає величину струму на датчику струму приладу обліку (рис. 2.23) на частоті певної гармоніки. Струм гармоніки задається від величини номінального струму через прилад обліку. Для досліджень цікаво задати величину струму 0,2 від I_n . Таким чином струм гармоніки має бути 0,87 А (діюче значення 0,87 А, амплітудне значення 1,2 А), відповідно напруга має складати 6,9 В (діюче значення 6,9 В, амплітудне значення 9,8 В). Частота струму задана за умовами експерименту, в даному випадку задана частота 150 Гц.

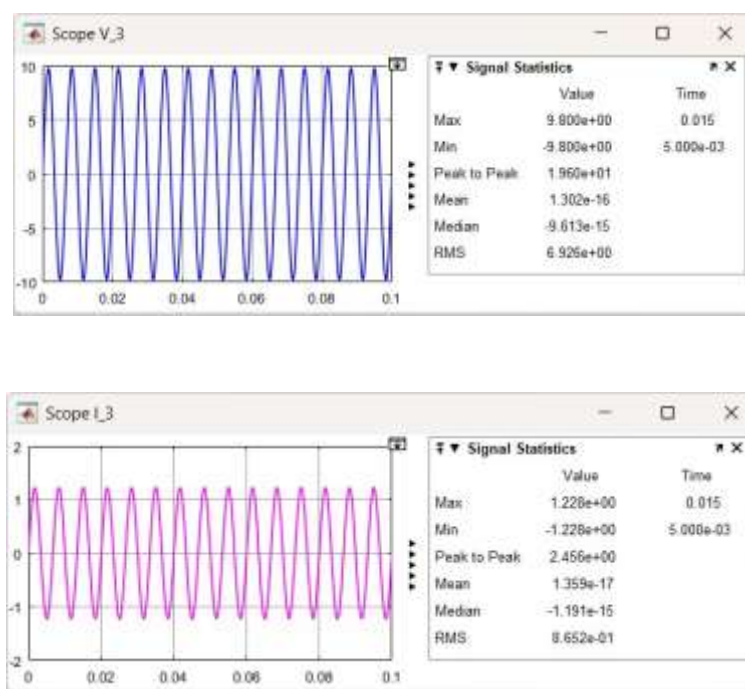


Рисунок 2.23 – Осцилограма напруги і струму третього кола схеми

Осцилограма струму, що проходить через прилад обліку (рис. 2.24) на частоті певної гармоніки. Струм в цьому колі становить 4,44 А. Частота струму за умовами експерименту, в даному випадку 50 Гц + 150 Гц.

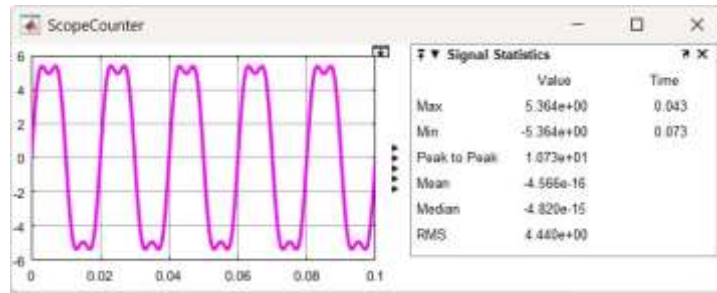


Рисунок 2.24 – Осцилограма форми струму, що проходить через прилад обліку, при наявності струму гармоніки ($f=150\text{Гц}$)

На рисунку 2.25 представлена осцилограма напруги, що наведена на прилад обліку, при наявності струму гармоніки ($f=150\text{Гц}$)

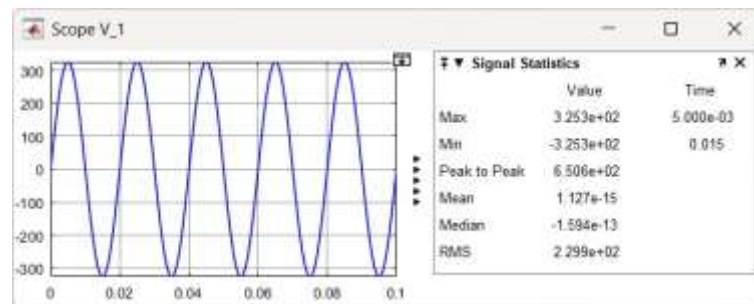


Рисунок 2.25 – Осцилограма напруги що наведена на прилад обліку, при наявності струму гармоніки ($f=150\text{Гц}$)

Спектральний аналіз, виконаний в середовищі Simulink, підтверджує, що задані параметри гармоніки присутні в струмі крізь прилад обліку (рис. 2.26)

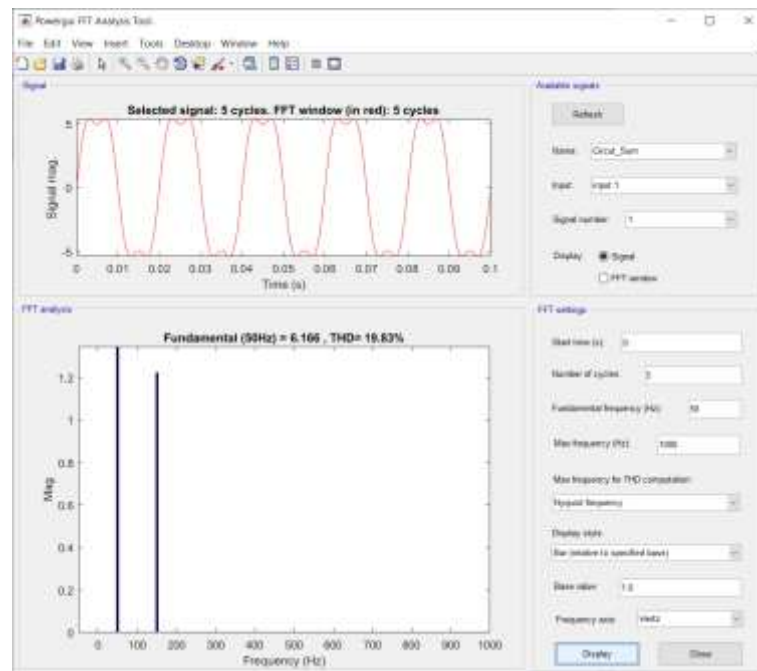


Рисунок 2.26 – Результат спектрального аналізу струму, що проходить через прилад обліку

Загальна розрахункова потужність, що проходить через прилад обліку при напрузі номінальній $U_W = U_n = 230$ В, і за наявності гармоніки тільки ($f=150$ Гц) в струмі, буде становитиме:

$$\bar{I}_W = \sqrt{\bar{I}_1^2 + \bar{I}_2^2 + \bar{I}_3^2} = \sqrt{0,0163^2 + 4,35^2 + 0,87^2} = 4,4362 \text{ А}$$

$$\bar{P}_W = \bar{U}_W \cdot \bar{I}_W = 230 \cdot 4,44 = 1,021 \text{ кВт}$$

Ця потужність і є такою, що задається для визначення показань приладу обліку.

Також стенд дозволяє задати додаткову гармоніку по напрузі на приладі обліку електричної енергії. Демонстрація заданої величини напруги гармоніки ($f=150$ Гц) із величиною кратною 0,2 від величини напруги $U_n = 230$ В, при наявності гармоніки ($f=150$ Гц) в колі струму, показана на рисунках 2.27, 2.28.

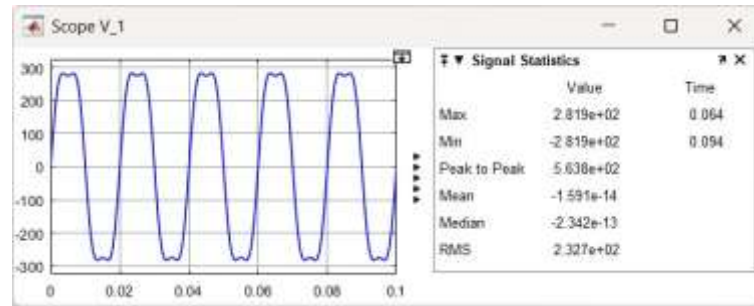


Рисунок 2.27 – Напруга на приладі обліку при наявності гармоніки ($f=150$ Гц) і величиною кратною 0,2 від величини U_n

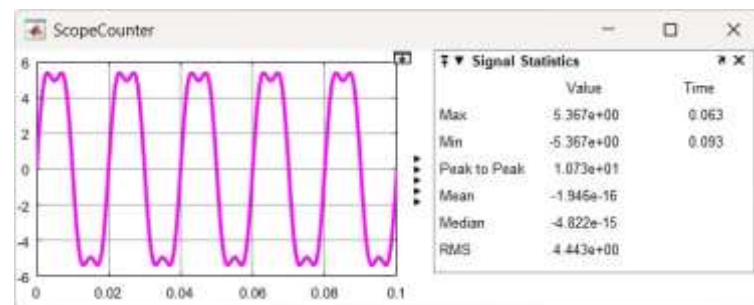


Рисунок 2.28 – Струм крізь прилад обліку при наявності гармоніки ($f=150$ Гц) і величиною кратною 0,2 від величини I_n

Таким чином моделювання підтвердило можливості розробленої схеми до створення необхідних форм струмів і напруг для тестування приладів обліку електричної енергії.

Наступний крок – розробити принципову схему стенду для перевірки лічильників

2.4.2 Схема стенда

За результатами моделювання в Simulink було розроблено принципову схему стенда перевірки лічильників із відповідними параметрами елементів. Принципова схема представлена на рисунку 2.29

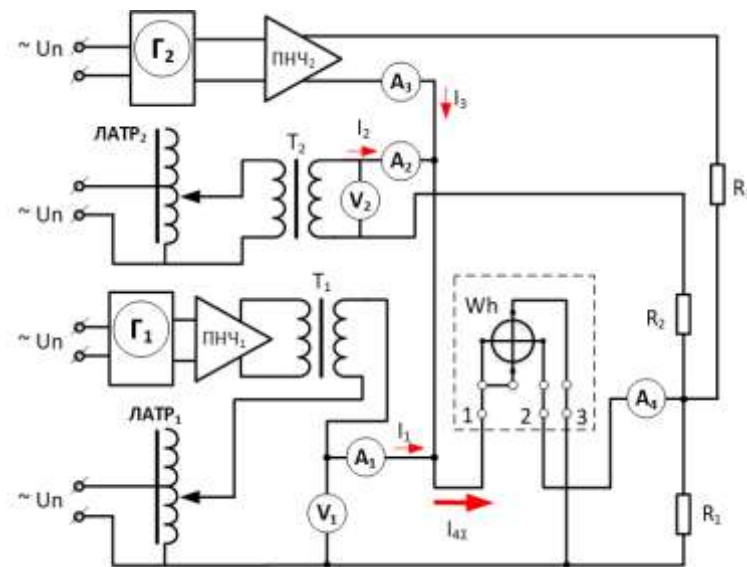


Рисунок 2.29 – Принципова схема стенда перевірки лічильників електричної енергії

Стенд складається з трьох струмових кіл. Перше струмове коло складається із лабораторного трансформатора (*ЛАТР₁*), вольтододатнього трансформатора (*T₁*), генератора звукових сигналів (*Г₁*), підсилювача низької частоти (*ПНЧ₁*), вольтметра (*V₁*), амперметра (*A₁*), приладу обліку електричної енергії (*Wh*), навантаження (*R₁*). Перше струмове коло представлено на рис. 2.30.

Перше струмове коло задає рівень напруги на клеммах 1; 3 приладу обліку електричної енергії (*Wh*). Рівень напруги контролюється вольтметром (*V₁*). Перше струмове коло має можливість задавати гармоніку по напрузі за допомогою генератора (*Г₁*) і підсилювача низької частоти (*ПНЧ₁*), який підключено до струмового кола за допомогою вольтододатнього трансформатора (*T₁*).

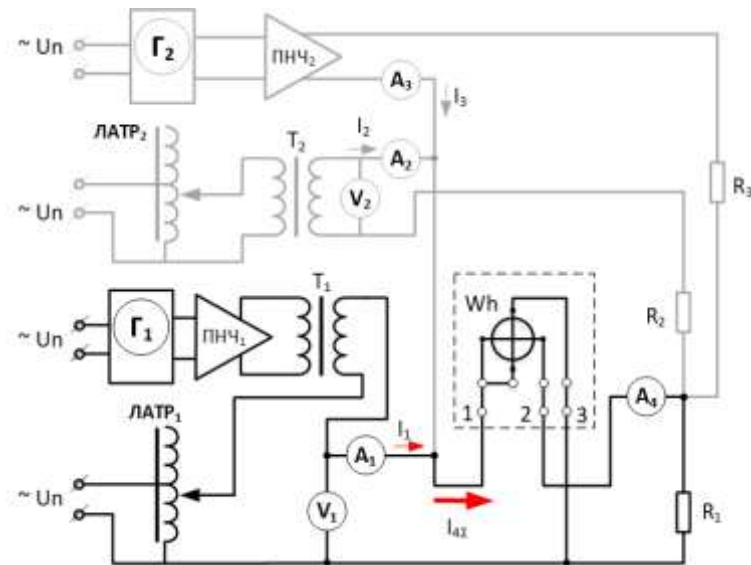


Рисунок 2.30 – Перше струмове коло, задає рівень напруги на вимірюваних клеммах приладу обліку електричної енергії

Друге струмове коло (рис. 2.31) складається із лабораторного трансформатора (ЛАТР_2), понижуючого трансформатора (T_1), вольтметра (V_2), амперметра (A_2), приладу обліку електричної енергії (Wh), навантаження (R_2).

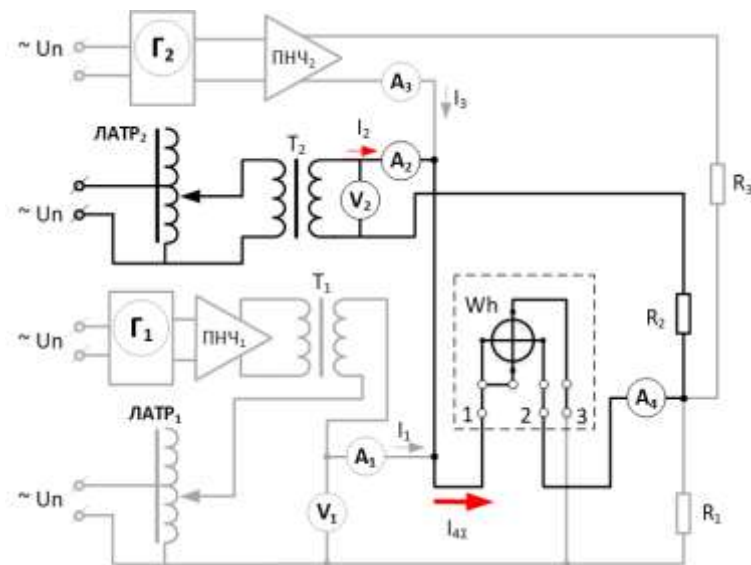


Рисунок 2.31 – Друге струмове коло, задає величину струму частотою 50 Гц крізь прилад обліку електричної енергії

Друге струмове коло, задає величину струму частотою 50 Гц крізь прилад обліку електричної енергії (**Wh**) (клеми 1, 2), величина струму контролюється амперметром (**A₂**)

В другому колі вимірювального стенду буде створюватися струм $I_2 = 0 - 7,2$ А. Цей струм проходить крізь струмові клеми приладу обліку, причому напруга на вольтових клеммах задається першим колом стенду і становить $U_1 = 100 - 250$ В. Розсіювана потужність на резисторі (**R₂**) при цьому становить $P_2 = 0 - 260$ Вт. Для приладу обліку такий струм разом із напругою U_1 буде обраховуватися як навантаження $P_4 = U_1 * I_2 = 250 * 7,2 = 1,8$ кВт. Таким чином регулюючи напругу за допомогою **ЛАТРА₂** на входних клеммах трансформатора (**T₁**), в струмовому колі приладу обліку електричної енергії створюється струм (**I₂**), який буде імітувати навантаження в мережі, яке буде фіксувати прилад обліку (**Wh**).

Третє струмове коло (рис. 2.32) складається із генератора звукових сигналів (**Г₂**), підсилювача низької частоти (**ПНЧ₂**), амперметра (**A₃**), приладу обліку електричної енергії (**Wh**), навантаження (**R₃**).

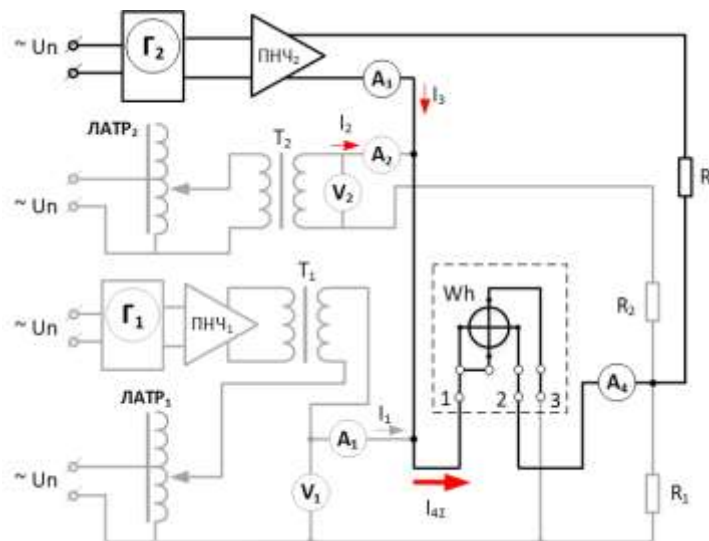


Рисунок 2.32 – Третє струмове коло, задає величину струму частотою від 0 до 5 кГц крізь прилад обліку електричної енергії

Третє струмове коло, задає величину струму частотою 0-5000 Гц крізь прилад обліку електричної енергії (Wh) (клеми 1, 2), величина струму контролюється амперметром (A_3). Величина струму (A_3) регулюється за допомогою блока живлення підсилювача низької частоти ($ПНЧ_2$). Величина струму (A_3) контролюється вольтметром цифровим лабораторним мультиметром Protek-4000. Навантаження (R_3) має величину 8 Ом потужність тепловідведення 100 Вт

В третьому колі вимірювального стенду буде створюватися струм $I_3 = 0 - 3$ А. Струм (I_3) буде створюватися за частотою заданою генератором сигналів (G_2), підсилений підсилювачем ($ПНЧ_2$), і буде проходити крізь струмові клема приладу обліку (Wh). Таким чином до струму I_2 гармонічної частоти із частотою 50 Гц, буде додаватися струм I_3 гармонічної частоти із частотою заданою генератором в діапазоні $f = 0-5000$ кГц. Таким чином на клемі вимірювального приладу моделюється стан із гармонічними коливаннями заданих частот і заданої амплітуди.

При підключенні приладу обліку (Wh), до вимірювального стенду і підключенню живлення до струмових кіл стенду, створюється можливість задавати необхідну напругу на напругових клемі вимірювального приладу і в той же час задавати струм крізь струмові клема приладу обліку, імітуючи навантаження до $P = 1,8$ кВт. До того ж є можливість додатково подати в струмове коло приладу обліку струм із частотами гармонік n (2, 3, 4 ... 50), а також інтергармонік, відношення сигналу гармоніки можна регулювати по відношенню до струму першої гармоніки. Також є можливість додавати гармоніки до напруги із частотами гармонік n (2, 3, 4 ... 50), відношення сигналу гармоніки можна регулювати по відношенню до напруги основної напруги. Що дозволяє відтворити вимоги за стандартом [71], де обмежено величину сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень напруги електропостачання не більше 8 %.

Порядок роботи стенда. В клему стенда встановлюється вимірювальний прилад (Wh). Лабораторний трансформатор ($ЛАТРА_1$) під'єднується до мережі живлення. За допомогою $ЛАТРА_1$ виставляється рівень напруги на клеммах 1, 3 лічильника (Wh), яка має відповідати потребам експерименту (діапазон регулювання напруги $U = 150-270$ В). Таким чином створюється струм $\bar{I}_1$.

Лабораторний трансформатор ($ЛАТРА_2$) під'єднується до мережі живлення. За допомогою $ЛАТРА_2$ виставляється величина струму крізь клему 1, 2 лічильника (Wh), яка має відповідати потребам експерименту (діапазон регулювання 0-8 А). Таким чином створюється струм $\bar{I}_2$ через прилад обліку.

Для створення гармонічних коливань в колі струму приладу обліку виконується наступне. До мережі живлення підключається генератор звукових сигналів (G_2). На генераторі задається необхідна частота сигналу (діапазон частот 0 – 5000 Гц). Заданий сигнал з генератора поступає на підсилювач низької частоти ($ПНЧ_2$). На підсилювачі низької частоти ($ПНЧ_2$) задається рівень вихідної напруги, яка створює струм $\bar{I}_3$. Що дозволяє створити струм певної гармоніки крізь прилад обліку.

Струм в першому колі $\bar{I}_1$, струм другого кола $\bar{I}_2$ і струм третього кола $\bar{I}_3$, при проходженні крізь прилад обліку електричної енергії ці струми об'єднуються в струм $\bar{I}_4 = \sqrt{\bar{I}_1^2 + \bar{I}_2^2 + \bar{I}_3^2}$.

На дисплеї електричного лічильника фіксуються показання W_1 . Через контрольний час показання фіксуються повторно W_2 . Різниця показань і буде потужністю, яку зафіксував прилад обліку (W_m).

$$W_m = W_2 - W_1$$

Розрахункова потужність синтезованого сигналу (W_c) буде розраховуватися перемноженням струму на напругу на приладі обліку. Вважаємо навантаження активним:

$$W_c = \bar{I}_w \cdot \bar{U}_w$$

де $\bar{I}_w$ – струм крізь прилад обліку (діючий струм), А; $\bar{I}_w = \bar{I}_4 = \sqrt{\bar{I}_1^2 + \bar{I}_2^2 + \bar{I}_3^2}$

$\bar{U}_W$ – напруга на приладі обліку, В; $\bar{U}_W = \bar{U}_1$

Порівнюючи розраховану величину потужності і зафіксовану приладом обліку, можна встановити залежність похибки (ξ) приладу обліку від частоти (λ) додаткового сигналу.

$$\xi(\lambda) = \Delta W = W_c - W_m$$

Таким чином знімається реальна характеристика чутливості приладу обліку електричної енергії на різні гармоніки в мережі.

2.4.3 Результати вимірювань приладів обліку

В експерименті було проведено заміри трьох типів приладів обліку, вони були різні за датою виготовлення. Електронних приладів обліку, в тому числі комбінованих різних фірм виробників, на стенді було перевірено чотири одиниці. Всі прилади обліку були обрані на один клас вимірювання. Було обрано однофазні прилади обліку для вимірювання активної енергії.

Прилад обліку підключався до стенду і проводилося вимірювання потужності. Порядок проведення: Задавалася потужність $P_{розр} = 1$ кВт (діюче значення струму $I_n = 4,35$ А і діюче значення напруги $U_n = 230$ В). Потім задавалася гармонічна частота ($n = 2, 3, 4, \dots 40$). Обирався напруга у відношення до номінальної напруги у відсотках (5, 10, 15, 20, 30). Задавався струм у відношенні до номінального струму у відсотках (5, 10, 15, 20, 30).

Замір проводився за інтервал часу, який дозволяє визначити показання приладу обліку для проведення розрахунку. Показання приладу приймалося за $P_{вим}$. Різниця в показаннях визначалася $\Delta P = P_{вим} - P_{розр}$. Таку різницю визначали для різних випадків потужності гармонік.

Графік замірів приладів обліку будувався у величинах сумарного коефіцієнта гармонічних спотворень до величини похибки вимірювання потужності (рис. 2.33). Де сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD) розраховувався за формулою:

$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1}$$

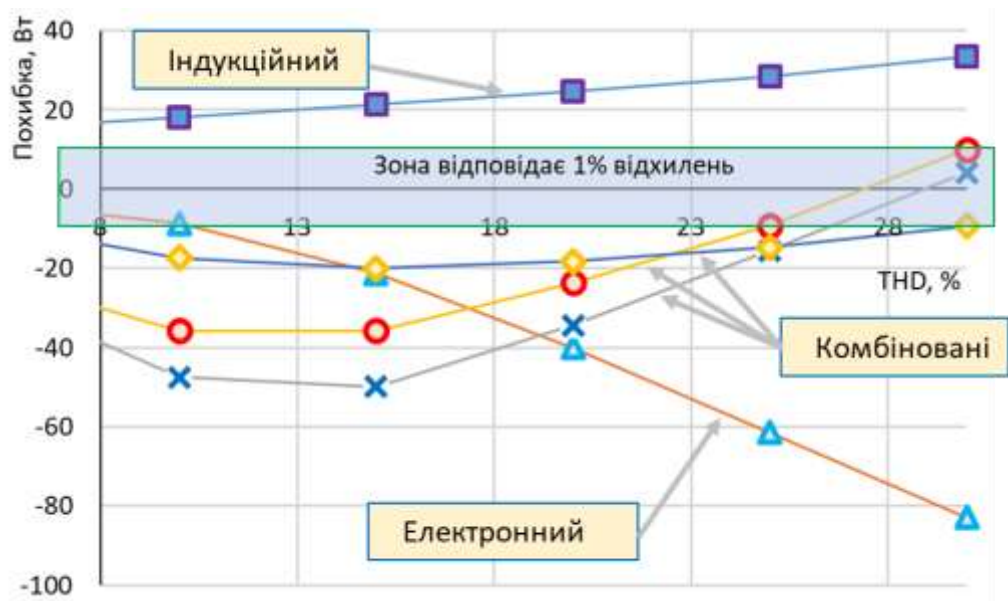


Рисунок 2.33 – Результат замірів похибки потужності в показаннях приладів обліку при наявності третьої гармоніки в струмі при різних THD. Потужність навантаження 1 кВт (активна потужність)

Для виконання замірів було обрано значення THD, що перевищує норматив (8%), щоб з'ясувати величини похибки для різних приладів обліку.

Із проведених замірів можна зробити висновок, що точність показань лічильників електроенергії істотно залежить від рівня THD в мережі. При цьому похибка у вимірюванні може досягати значень 10–20 % . В той же час за даними фірми Fluke така похибка може досягати до 68 % [72]. А рівень THD більше 20% навіть може призводити до руйнувань лічильників.

Наведена у вигляді графіків невелика частина результатів експериментів із лічильниками дозволяє стверджувати, що є в наявності суттєва залежність похибки вимірювань активної енергії існуючими приладами обліку електричної енергії від коефіцієнту спотворення синусоїдальності напруги і струму.

Висновки по розділу 2

Супровідні документи по приладам обліку не мають даних щодо відповідності роботи приладів в режимах на межі дозволених стандартами, або в мережі із наявністю гармонічних збурень. Результат пошуку схем реально використовуваних приладів обліку не дозволяє промодельовати поведінку приладів обліку в мережі із наявністю гармонічних збурень. Тому було розроблено стенд для перевірки залежності показань приладів обліку від величини коефіцієнту гармонічних спотворень в мережі.

Результати досліджень на основі експерименту щодо відповідності показань приладів обліку при наявності різних гармонічних коливань в електричній мережі продемонстрували наявність недокументованих відхилень показань приладів обліку.

Відхилення показників приладів обліку має різницю для різних типів приладів обліку.

Відхилення показників приладів обліку може бути пов'язано із різними типами датчиків зняття напруги і струму, різними АЦП і програмними особливостями процесорів, що використовуються в приладах обліку електричної енергії.

Загальний висновок від проведених досліджень наступний: підвищити відповідність показань приладів обліку при наявності гармонічних коливань в мережі не представляється можливим. Єдине рішення – це зменшити гармонічні збурення в електричній мережі.

РОЗДІЛ 3 ЗАХОДИ ЗІ ЗМЕНШЕННЯ ГАРМОНІЧНОЇ СКЛАДОВОЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

3.1 Заходи по зменшенню гармонічної складової в електричній мережі

На основі аналізу наукових робіт [9, 73, 74, 75] можна узагальнити заходи щодо зниження негативного впливу гармонічних складових в електричній мережі, класифікувавши їх на такі групи:

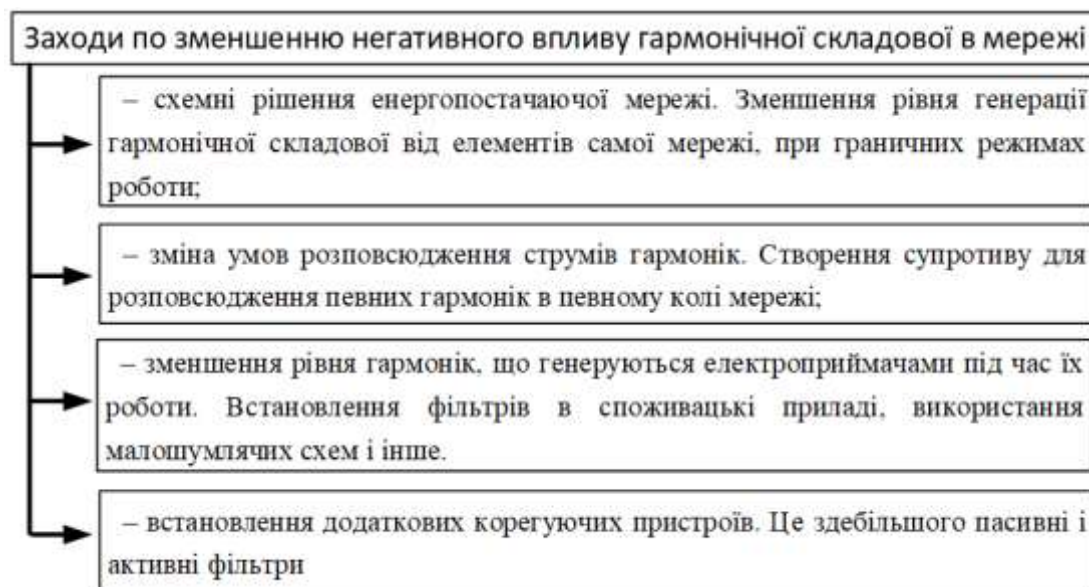


Рисунок 3.1 – Згруповані заходи зниження негативного впливу гармонічних складових в електричній мережі

Найбільшого поширення для зменшення впливу гармонік в низьковольтних та високовольтних мережах набули такі засоби, як резонансні фільтри [9, 74, 76, 77]. Такі пасивні фільтри мають недоліки, до яких можна віднести: паразитний активний опір; технологічний розкид значення ємності конденсатора та індуктивності реактора фільтра, а також зміна їх значень у процесі. Тому їх використання здебільшого не дає бажаного ефекту [78].

Більш широкі можливості мають активні та гібридні фільтри [31, 79, 80]. Застосування силових активних фільтрів дозволяє усунути недоліки, характерні для резонансних фільтрів. В той же час активні фільтри також мають недоліки,

найбільший з яких – це розширення частотного спектру амплітуд вищих гармонік, які мають бути послаблені.

Для усунення резонансних явищ в ЕЕС найперспективнішим є використання гібридних фільтрів [81, 82]. При цьому гібридний фільтр є комбінацією пасивного та активного фільтра, тим самим поєднуючи їх переваги і недоліки.

Всі розглянуті фільтруючі пристрої не дають бажаного ефекту для захисту приладів обліку від гармонічних збурень. І їх застосування на підприємстві теплопостачання виявляється недоцільним.

Одним із найперспективніших шляхів вирішення проблеми вищих гармонік є метод, не пов'язаний із застосуванням додаткових пристроїв.

Тому для покращення стану із гармоніками в мережі було обрано шлях по зменшенню часу знаходження системи в режимах із надспоживанням електричної енергії.

3.2 Зменшення гармонічної складової за рахунок створення умов припинення надспоживання електричної енергії

При дослідженні статистичних даних теплопостачання великого міста України було отримано таку картину: у разі зниження рівня теплозабезпечення приміщень, у яких перебувають люди, населення використовувало різноманітні способи компенсації дефіциту теплового потоку за рахунок інших доступних видів енергії. Низька якість теплопостачання призводить до використання побутовими споживачами додаткового газового та електричного обігріву для досягнення бажаної температури в приміщеннях [83].

При детальному розгляді питання було встановлено наявність залежності обсягів споживання електричної енергії від рівня постачання теплової енергії для нормальних режимів роботи енергосистеми протягом останніх трьох років [12].

3.2.1 Причина надспоживання електричної енергії – дефіцит теплової енергії

Оскільки в Україні споживаються значні обсяги теплової енергії, закономірно постає питання щодо її економії. Однак у кліматичних умовах України неможливо виконувати виробничі завдання або навіть задовольняти побутові потреби без забезпечення теплового комфорту в приміщеннях. Тому суттєве скорочення споживання енергії на теплозабезпечення є обмеженим.

Питанням забезпечення комфортної температури в зоні постійного перебування людини присвячено численні дослідження [37, 84, 85], а відповідні вимоги закріплено у стандартах [86, 87] та постановах Кабінету Міністрів України [88, 89]. Водночас тривають роботи щодо вдосконалення нормативів та обґрунтування шляхів зниження витрат тепла. Одним із таких шляхів є пошук оптимальних режимів керування або режимів технологічних процесів вироблення й транспортування теплової енергії, за яких зменшуються витрати первинного енергоресурсу.

Як зазначено в [90], теплове навантаження абонентів не є сталою величиною. Воно змінюється залежно від погодних умов (температури зовнішнього повітря, швидкості вітру, вологості тощо), режиму гарячого водопостачання та інших факторів. Для забезпечення високої якості теплопостачання, а також досягнення економічних режимів виробництва та транспортування теплоти застосовуються відповідні методи регулювання: центральне, групове, місцеве та індивідуальне [91, 92].

Оскільки основне завдання систем опалення [91] полягає у підтриманні температури всередині приміщень на заданому рівні, найбільш простим та ефективним способом його реалізації є індивідуальна автоматизація, тобто встановлення авторегуляторів безпосередньо на нагрівальних приладах. За такого підходу спрощуються методи регулювання відпуску тепла від ТЕЦ. Однак упровадження індивідуального регулювання пов'язане зі значними початковими витратами і нині не завжди є можливим.

Як зазначено у [83], на основі моніторингу стану споживчого попиту на паливно-енергетичні ресурси можливе здійснення ефективнішої диспетчеризації великих джерел генерації тепла, що здатне зробити систему теплопостачання більш спостережуваною та керованою. Для вдосконалення управління енергоспоживанням у муніципальному господарстві в [83] проводилися дослідження сезонних закономірностей взаємопов'язаного споживання електроенергії, газу та тепла у комунально-побутовому секторі. При цьому враховувалися дефіцит тепла та дефіцит сонячного освітлення у житлових приміщеннях.

За результатами досліджень із загального потоку даних про електроспоживання конкретного житлового масиву було виділено складову, пов'язану з додатковим електрообігрівом. У [83] висловлено припущення, що якісній роботі системи централізованого теплопостачання відповідає певна норма споживання електричної енергії житловими масивами. По суті, це один із описів взаємопов'язаності енергій на рівні споживача.

Йдеться про такий обсяг споживання електричної енергії, який є достатнім для забезпечення нормальної життєдіяльності за умови якісного теплопостачання, коли електроенергія не використовується для додаткового підігріву приміщень. Після формалізації такого підходу з'являється можливість визначати поточне надспоживання електричної енергії як різницю між фактичним рівнем споживання та тим рівнем, який мав би місце за умов якісного теплопостачання.

Виявлення факту надспоживання можна інтерпретувати як сигнал для систем централізованого теплопостачання щодо необхідності збільшення обсягів відпуску тепла, а величину надспоживання – як кількісний показник незадоволеності споживачів якістю теплопостачання.

3.2.2 Регулювання відпуску тепла на опалення

Існують різні типи регулювання відпуску тепла на опалення (залежно від пункту здійснення). В [92] відзначено три методи автоматичного регулювання відпуску тепла на опалення:

- по збуренню (із зміни зовнішньої температури повітря, швидкості вітру та ін.) – це основний метод центрального регулювання;
- за відхиленням регульованого параметра (за температурою повітря всередині приміщень), цей метод здійснюється при індивідуальному регулюванні (можливий також при місцевому регулюванні);
- комбінований метод (регулювання як з відхилення, так і збурення).

Застосування комбінованого методу регулювання вважається найефективнішим. Однак, в даний час це неможливо через відсутність на ТЕЦ інформації про температуру повітря в приміщеннях споживачів тепла. Установка відповідних датчиків, що фіксують та передають інформацію, не є в даний час реальним рішенням як з технічної, так і з економічної точки зору.

Тому ефективне регулювання може бути досягнуто тільки за допомогою впровадження нових підходів до комплексного оперативного управління виробленням, передачею та розподілом теплової та електричної енергії.

В [83] пропонується побудова замкнутої системи регулювання подачі тепла системою центрального теплопостачання на основі системи моніторингу пов'язаного споживання енергоресурсів побутовими споживачами. Використання такої системи регулювання дає системам центрального теплопостачання можливість керування режимами подачі тепла з урахуванням змін реакції побутових споживачів (вираженої в електродотопах), пов'язаної із недостатнім рівнем якості теплопостачання. Але в [93] зазначено, що у моделі, запропонованій у [83], необхідно також враховувати зростання енергоозброєності побутових споживачів, що спостерігається протягом останніх років, що призводить до збільшення побутового електроопалювального

потенціалу. Тому визначення недопоставки тепла тільки по обсягах споживання електричної енергії не є достовірним маркером.

Одним із можливих рішень проблеми може бути створення інформаційної системи моніторингу якості теплопостачання, заснованої на статистичному аналізі, яка дозволить отримати повну інформацію про просторово-часову структуру споживання паливно-енергетичних ресурсів.

3.2.3 Моніторинг якості теплопостачання

Як зазначено в [90]: *"Задача оптимізації систем теплопостачання представляє велику методичну складність у зв'язку з тим, що ці системи є підсистемами великих енергосистем, безперервно розвиваються в часі і характеризуються багатofакторною залежністю економічних показників від схеми, типу обладнання та режиму роботи системи централізованого теплопостачання, так і від структури обладнання та режиму роботи енергетичної системи в цілому."*

Враховуючи складність завдання оптимізації теплопостачання, її практична реалізація можлива лише за умови застосування математичного моделювання, сучасної комп'ютерної техніки, інформаційних систем та технологій.

Сучасна система моніторингу дає можливість отримання доступу до даних в режимі реального часу, до того ж дані зберігаються в певному форматі на серверах, що дозволяє не тільки отримувати швидкий доступ до них а також проводити обробку цих даних за допомогою мережевого програмного забезпечення.

Через неможливість експериментування на великих системах центрального теплопостачання виникає необхідність у теоретичній обробці архівних даних, у математичному моделюванні попиту на електричну та теплову енергію, у створенні математичних моделей регулювання подачі тепла та цифрових експериментах.

Комп'ютерні системи та технології дозволяють зібрати великі архіви первинних даних про поведінку об'єктів енергопостачання у різних умовах. Це дає можливість моделювати стратегії управління споживанням енергоресурсів за допомогою інформаційних систем та технологій.

Впровадження автоматизованої системи моніторингу якості теплопостачання житлових масивів дозволить оптимізувати роботу диспетчерського центру систем центрального теплопостачання та скоротити витрати на виробництво, передачу і розподіл теплової та електричної енергії. В [83, 92] розглядається концепція автоматизації обліку і управління побутового енергоспоживання і описується використання апаратно-програмного комплексу для моніторингу якості теплопостачання житлових масивів.

Для удосконалення управління енергоспоживанням в муніципальному господарстві [12, 90, 93, 94] проводяться дослідження сезонних закономірностей зв'язаного споживання електроенергії, газу і тепла в комунально-побутовому секторі. При цьому враховується дефіцит тепла і дефіцит сонячного світла в житлових приміщеннях. За результатами досліджень із загального потоку даних про електроспоживання для конкретного житлового масиву виявляється складова, зв'язана з електричним додатковим підігрівом. В [83] зроблено припущення, що якісній роботі системи центрального теплопостачання відповідає певна норма споживання електричної енергії житловими масивами.

3.2.4 Пов'язаність різних типів енергії

Статистичні дані показали наявність взаємо пов'язаності різних типів енергії при її використанні споживачами. Запропонована ідея – розглядати всю сукупність енергій, яку споживає споживач у вигляді одного загальноенергетичного споживання. Була сформульована концепція єдиного узагальненого енергоспоживання. Загальний принцип концепції єдиного узагальненого енергоспоживання описана в роботі [12].

Виходячи із того, що кожний тип енергії має свої властивості, притаманні саме йому (а це і технологічні особливості, одиниці вимірювання, параметри

використання і навіть вартість), то порівнювати різні види енергії дуже важко. До цього їх порівняння проводилося в умовних одиницях: тонах умовного еквівалентного палива. Таке вимірювання становило певні незручності. Наприклад, не враховувалися такі параметри як: вартість постачання; швидкість використання і інші. Для того щоб привести до одного виміру різні величини, потрібна інша система оцінювання.

Було запропоновано створення деякої функції, яка б узгодила правила, за якими можна було би порівнювати різні типи енергії між собою. В функції мають ураховуватися: цінність енергії для споживача, швидкість подачі і інші параметри. Найбільш очевидним варіантом є виведення кореляційної залежності одного типу енергії з іншим [12].

Запропоновано величину певного енергоносія або певної енергії урахувати через залежність:

$$Q_i = Q_v \cdot f(B_{\text{ринк}}; k_{\text{потр}}; k_{\text{зовн}}) \quad (3.1)$$

де $B_{\text{ринк}}$ – вартість певного виду енергії на ринку;

$k_{\text{потр}}$ – безрозмірний коефіцієнт потреби споживача в певному виді енергії;

$k_{\text{зовн}}$ – безрозмірний коефіцієнт потреби в певному виді енергії в залежності від температури оточуючого середовища;

Q_v – загальний обсяг відпущеної споживачеві енергії певного типу.

Модель зв'язаності енергій пропонується побудувати в об'ємі як поєднання векторів що виходять з однієї точки, що пропорційні приведеній вартості відповідного типу енергії (рис. 3.2). Кут нахилу вектора $\alpha_{i,i-1}$ має відповідати ступеню заміщення одного типу енергії іншим. Таким чином отримується залежність різних видів енергії що споживає споживач

$$\alpha_{i,i-1} = \arctg \frac{Q_i}{Q_{i-1}} * k_{i,i-1} \quad (3.2)$$

де k_{i-1} – коефіцієнт ступеню заміщення типу ***i-1*** енергії до ***i*** енергії;

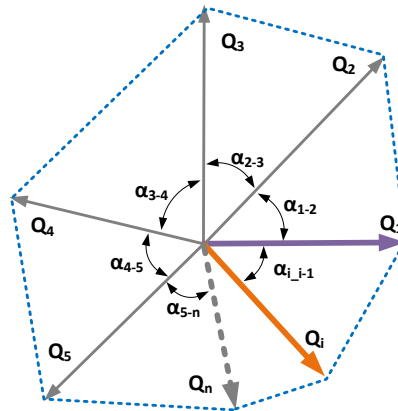


Рисунок 3.2 – Енергії, що споживає споживач, у вигляді векторної діаграми

При використанні такого підходу можливо врахувати різну кількість типів енергії, що споживає споживач. Виходячи із концепції взаємопов'язаності енергій, вводиться поняття «тіло енергетичного споживання» [12]. В якості прикладу можна показати сформоване векторами «тіло енергоспоживання» за двома видами енергії (рис. 3.3)



Рисунок 3.3 – Діаграма пов'язаності теплової і електричної енергії

Споживання теплової енергії в нашій країні є доволі високим. І при недостатніх обсягах постачання теплової енергії, споживачі компенсують його іншими доступними типами енергії. Але один із видів енергії, а саме електрична енергія, є самою універсальною. Саме цю енергію і використовують в першу чергу для компенсації недоотриманої теплової. Опираючись на концепцію взаємопов'язаності енергій, демонструючи її у графічному виконанні – «тіло енергетичного споживання» (рис. 3.4), стає очевидним, що зміни у споживанні видів енергії впливають на тіло енергоспоживання. Таке «тіло», його площа має бути певної величини для сезону, години доби, зовнішньої температури і інші.

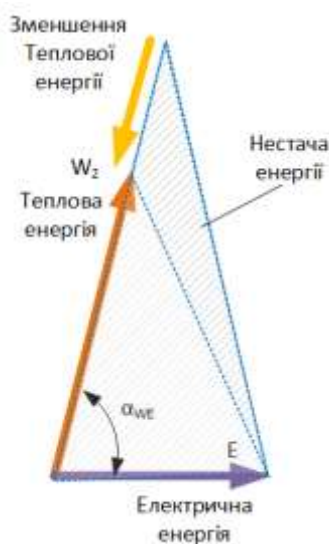


Рисунок 3.4 – Графічне представлення зменшення обсягів теплової енергії

Тіло енергоспоживання має фіксовану площу і зменшення цієї площі має бути скомпенсовано доданою площею яку створює збільшене споживання іншого виду енергії. В нашому прикладі ця компенсація виконується за рахунок електричної енергії (рис. 3.5).

Але потрібно звернути увагу, що компенсація обсягами електричної енергії відбувається поза її межі довготривалого використання (рис. 3.5). І використання таких обсягів електричної енергії призводить до погіршення її якості [95, 96].



Рисунок 3.5 – Збільшення споживання електричної енергії для компенсації площі тіла енергоспоживання

Таким чином концепція взаємопов'язаності енергій пояснює умови, за якими контроль споживання одного типу енергії дозволяє проводити контроль інших видів енергії споживача за якісними показниками.

Автором розглядається можливість перетворення інформації, що неявно міститься в добових профілях електроспоживання в інформацію про якість теплопостачання. У такому разі виявлення надспоживання електроенергії буде сигналом про виникнення розладки в системі теплопостачання, і свідчить про низьку якість теплопостачання.

3.3 Умови побудови системи моніторингу

Важливою умовою нормального функціонування будь-якого технологічного процесу є своєчасне виявлення в ньому помилок і відхилень параметрів процесу від допустимих значень, а також ідентифікація чинників, які спричинили ці відхилення.

Мета моніторингу динамічних процесів полягає у виявленні відхилень і запобіганню їх наслідків на основі дослідження часових рядів, що містять інформацію про параметри процесу за певний часовий проміжок.

Статистичний моніторинг може дозволити виявити наявність, масштаби та періоди аварійного перебігу процесу, а також визначити моменти відхилень та діагностувати їх причини. Моніторинг використовують для того щоб контролювати різні параметри технологічних процесів а за потреби і надавати дані для регулювання параметрів процесу з метою запобігання збоям. Можливість моніторингу та оптимального управління різними процесами на основі аналізу часових рядів складної структури має величезне практичне значення. Цьому питанню присвячені роботи [97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104].

Моніторинг динамічних процесів можна звести до дослідження характеристик часового ряду. Можна сформулювати завдання моніторингу в такому випадку:

- виявлення прихованих, неявних компонент часового ряду для аналізу причинно-наслідкових зв'язків генеруючої його динамічної системи;
- виявлення моментів часу змін властивостей досліджуваного часового ряду;
- виявлення моментів часу виходу значень певних параметрів процесу з заданої області;
- оптимізацію регулювання функціонування аналізованої системи і контроль якості кінцевого продукту.

3.4 Огляд математичних моделей та методів для моніторингу властивостей динамічних процесів

3.4.1 Аналіз структури часових рядів виявлення причинно-наслідкових зв'язків динамічної системи

Динамічні процеси, які у технічних системах породжують часові ряди складної структури, містять різні компоненти, аналіз яких дозволяє зрозуміти

природу системи, і може бути використаний для розробки стратегій оптимального управління.

Основні методи аналізу часових рядів представлені у роботах наступних авторів: William W. [105], Бриллинджер Д. [106], Maggino F., Стюарт А. [107, 108], Отнес Р., Эноксон Л. [109] і інші.

Обробка часових рядів, що породжуються технічними системами та виробничими процесами, дає можливість вивчення прихованих властивостей відповідних систем та процесів. Найбільш загальним завданням дослідження рядів, як зазначено в [109], повинна бути ідентифікація динамічних властивостей об'єктів, що їх породжують. Однак, на практиці дослідники часто обмежуються аналізом окремих компонентів ряду.

У [109] розглянуто два класи задач аналізу рядів динаміки: задачі ідентифікації об'єкта, що породжує ряд (підбір деякої математичної моделі, що генерує адекватний часовий ряд) та завдання фільтрації часових рядів, мета якої полягає у виділенні та вивченні деякого цікавого компонента ряду (названого автором "корисної складової").

Завдання аналізу часових рядів розглянуто також авторами Кендалл М.Дж. і Стюарт А [108]. Кінцевою метою аналізу часових рядів, на думку авторів, є досягнення глибшого розуміння причинних механізмів, що зумовлюють появу цих часових рядів, що зводиться до вивчення різних типів поведінки окремих рядів та побудови моделей, які могли б ці типи поведінки пояснити.

У реальній практиці моніторингу динамічних процесів, як правило, доводиться мати справу з рядами, що мають складну структуру. Це пов'язано з тим, що у формування часового низки впливає безліч взаємозалежних чинників, врахувати вплив яких порізно важко, а часом неможливо.

3.4.2 Виявлення моментів зміни властивостей часового ряду

Одним із завдань моніторингу виробничих процесів є діагностика збоїв та відмов. Зводиться вона до вирішення "завдання про розладку", тобто виявлення

того, що відбувається в невідомий момент часу стрибкоподібної зміни властивостей часового ряду, що спостерігається.

У наступних літературних джерелах розглянуто як класичні, так і сучасні підходи до виявлення відхилень у різних процесах [110, 111, 117, 118, 119, 120, 121]

Рішенню "завдання про розладнання" присвячені роботи [111, 117]. "Розладкою" випадкових послідовностей автори називають зміну будь-яких їх імовірнісних характеристик.

Як розглянуто в [111, 117] існує два класи "завдань про розладнання".

Перший клас отримав назву "Завдання про якнайшвидше виявлення розладнання". Постановка завдання звучить так: нехай послідовно в часі надходить інформація про випадковий процес (формується часовий ряд), у певний момент часу відбувається зміна будь-якої ймовірнісної характеристики процесу. Постає питання, як якнайшвидше виявити цю зміну після того, як вона сталася, і при цьому обмежити деякою величиною помилкові сигнали тривоги. Тобто, необхідно виявити "розладнання" якнайшвидше після того, як воно відбулося при заданому рівні помилкових тривог, і при цьому не потрібно вказувати точний момент часу, коли відбулася "розладнання".

Другий клас називається "Апостеріорне завдання про розладнання". Постановка завдання така: нехай пред'явлено реалізацію випадкового процесу (є часовий ряд). Якщо вибірка не є статистично однорідною, тобто її ймовірнісні характеристики не є незмінними в часі, виникає завдання виявлення моментів часу зміни ймовірнісних характеристик і розбиття вихідної вибірки на кілька статистично однорідних фрагментів. При такій постановці до початку розв'язання задачі збирається кінцева вибірка спостережень параметрів процесу, після чого потрібно як найточніше оцінити момент виникнення "розладнання".

Виходячи з вище сказаного, формальна постановка задачі виявлення "розладнання" наступна [110, 111].

Нехай дана випадкова послідовність $x_1, x_2, \dots, x_N$, яка в певний момент часу t_0 стрибкоподібно змінює свої властивості. Ці властивості однозначно визначаються вектором параметрів θ . Це означає, що при $t \leq t_0 - 1$ вектор $\theta = \theta_1$, а при $t \geq t_0$ вектор $\theta = \theta_2$. Необхідно, спостерігаючи послідовність $x_1, x_2, \dots, x_N$, виявляти момент "розладнання" t_0 .

В [110] автор наводить варіанти критеріїв для оптимізації побудови алгоритмів розв'язання задач про "розладнання". Щодо першого класу задач про "розладнання" в [110] запропоновані такі критерії:

1. Необхідно розробити алгоритм подачі сигналу про те, що відбулася "розладка", який мінімізує середній час запізнення її виявлення при заданому математичному очікуванні кількості помилкових тривог, що надійшли до моменту виникнення "розладнання".

2. Необхідно мінімізувати середній час запізнення у виявленні "розладнання" при заданій ймовірності помилкових тривог.

3. Необхідно розробити алгоритм, який мінімізує верхню межу середнього значення запізнення виявлення "розладнання" за всіма можливими моментами виникнення "розладнання" при заданому значенні середнього часу від початку спостереження процесу до подання помилкового сигналу про виникнення розладки за умови, що "розладнання" ще не відбулося.

В літературі пропонується байєсівська постановка для задачі по пошуку «розладнання» [112]:

$$\rho(\pi, t_a) = P_\pi(t_a < t_0) + cM_\pi(t_a - t_0/t_a \geq t_0)P_\pi(t_a \geq t_0)$$

де $P_\pi(t_a < t_0)$ – ймовірність хибної тривоги;

$M_\pi(t_a - t_0/t_a \geq t_0)$ – середній час запізнення виявлення моменту "розладки" за умови, що сигнал тривоги не є хибним ($t_a \geq t_0$);

c – константа, ваговий коефіцієнт, $c > 0$ (передбачається, що момент виникнення "розладки" розподілено за геометричним законом).

У [113, 114] наводиться критерій оптимізації апостеріорних алгоритмів розв'язання задач про "розладку": потрібно мінімізувати ймовірність виходу оцінки моменту "розладки" із заданих допусків

$$P(|\hat{t}_0 - t_0| > n) \rightarrow \min.$$

Порівняння Байєсівського підходу BEAST з класичними моделями наведено в таблиці табл. 3.1 [112, 113, 114, 115]

Таблиця 3.1 – Порівняння Байєсівського підходу BEAST з класичними моделями

Аспект	BEAST (байєсівський)	Класичні моделі (ARIMA, STL)
Математична модель	$y_t = S_t + T_t + E_t + \varepsilon_t$	$y_t = T_t + S_t + \varepsilon_t$ (адитивна)
Обробка changepoints	Автоматично детектує невідома кількість точок змін	Вимагає фіксованого числа точок змін або ручного вибору
Оцінка параметрів	Bayesian Model Averaging — агрегує багато моделей, враховує невизначеність	Одна найкраща модель — ігнорує невизначеність моделі
Висновок	Повні розподіли параметрів (прогнозні інтервали)	Point estimates (одна точка)
Нелінійний тренд	Piece-wise лінійний функціонал — автоматично	Вимагає ручного вибору полінома

3.4.3 Виявлення моментів виходу окремих параметрів процесу за допустиму область значень

В умовах оперативного управління процесом, пов'язаного із необхідністю прийняття рішення з урахуванням обробки поточної інформації, може виникнути завдання виявлення моментів виходу окремих параметрів процесу за припустиму область значень. І тут важливими є відповіді такі запитання. Коли відбулися зміни? Чому вони сталися?

В [122] розглядаються чотири стани процесу: відсутність змін, ступінчаста зміна, зміна коефіцієнта лінійного зростання, випадкове імпульсне відхилення. Зазначається, що іноді доцільно враховувати як сам факт переходу процесу з одного стану до іншого, але й ступінь і причину зміни.

Для цього необхідна організація безперервного контролю з метою виявлення моментів та причин відхилень у процесі. При цьому необхідний механізм для оцінки важкодоступних для безпосереднього вимірювання та спостереження параметрів системи, що впливають на перебіг процесу.

Як зазначено авторами в [97, 123] у більшості галузей промисловості використовувалися (а в деяких досі використовуються) одновимірні карти для контролю окремих характеристик якості продукції або ключових технологічних параметрів, що впливають на якість кінцевого результату. При такому методі встановлюються верхні та нижні межі допустимих значень змінних, що спостерігаються, відповідні хорошій якості кінцевої продукції. Зазвичай межі встановлюються в межах $\pm 3\sigma$, де σ - середньоквадратичне відхилення від значення параметра, що відповідає найкращій якості кінцевої продукції. Сигнал тривоги надходить у момент, коли контрольована змінна набуває значення поза цими межами.

Проблема при такому підході пов'язана з тим, що хоча окремі параметри процесу певним чином впливають на якість результату, але жоден із них самотійно не визначає якість кінцевого продукту. Якість продукції - багатовимірна властивість, вона визначається одночасно оптимальними значеннями всіх параметрів, що впливають. У зв'язку з цим часто виникає завдання оптимізації процесу одночасно за декількома характеристиками. При цьому розглядається можливість завдання такого режиму для процесу, щоб визначити характеристики можна було утримувати в заданих межах.

Завдання ускладнює те що технологічні параметри можуть корелювати між собою.

Для вирішення цих проблем можна скористатися методом головних компонентів [121, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131]. При цьому постановка задачі буде наступною: на основі розкладання часового ряду на складові приховані компоненти та подальшого аналізу цих компонентів виявити моменти виходу окремих параметрів процесу за область допустимих значень.

Необхідно відзначити, що розглянутий підхід до вирішення проблеми не завжди здатний однозначно ідентифікувати причину будь-якого відхилення в перебігу технологічного процесу. Однак, за його допомогою можна виділити

періоди (або моменти часу) виходу окремих параметрів процесу за допустиму область значень.

Проміжний підсумок

Підсумовуючи вищесказане, для дослідження проблеми моніторингу якості теплопостачання необхідно зупинитися на наступних завданнях:

1. Для виявлення природи процесів, що протікають, і встановлення причинно-наслідкових зв'язків систем центрального теплопостачання провести аналіз структури часових рядів пов'язаного споживання енергоресурсів шляхом розкладання рядів на складові структурні компоненти.

2. На основі аналізу структурних змін часових рядів виявити моменти "розладки" або періодів аварійного ("сигнального") перебігу процесу теплопостачання або функціонування системи центрального теплопостачання.

3. При аналізі зв'язаного споживання енергоресурсів, на основі розкладання часового ряду споживання електроенергії на складові приховані компоненти та подальшого аналізу цих компонентів виявити моменти виходу споживаної електроенергії за область нормативних значень.

4. Оцінити (у різні періоди часу) показник якості електричної енергії, що є результатом функціонування системи центрального теплопостачання.

3.5 Алгоритм виявлення структурних змін часових рядів на основі лінійного варіанта сингулярно-спектрального аналізу

Алгоритм виявлення структурних змін часового ряду кінцевої довжини на основі сингулярно-спектрального аналізу:

Крок 1. Формується часовий ряд $X_N = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}$ довжиною N , для подальшого дослідження, ряд заноситься до бази даних.

Крок 2. Здійснюється перевірка наявності у низці більше двох елементів. Тобто перевірка умови ($N > 2$): якщо умова виконується, здійснюється перехід до Кроку 3, інакше до Кроку 1.

Крок 3. Встановлюється ліва межа діапазону перегляду на перший елемент x_0 часового ряду X_N , що відповідає присвоєнню початкового значення відповідному параметру $i := 0$.

Крок 4. Проводиться аналіз додаткової інформації про ряд даних для вибору оптимальної довжини діапазону перегляду D , L – параметра сингулярно-спектрального аналізу (довжини вікна), ϵ – мінімального рівня значущості структурних компонент часового ряду.

Крок 5. Вводиться значення параметра D . Вводиться значення параметра L . Вводиться значення параметра ϵ .

Крок 6. Здійснюється перевірка умови ($D < N$): якщо умова виконується, то здійснюється перехід до Кроку 7, інакше до Кроку 5.

Крок 7. Встановлюється правий кордон діапазону перегляду на елемент часового ряду $x_{(D+i-1)}$ з порядковим номером $(D + i - 1)$.

Крок 8. З часового ряду X_N витягується фрагмент завдовжки D з відповідними лівим та правим кордонами $[i; D + i - 1]$.

Крок 9. Проводиться сингулярне розкладання фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду з межами $[i; D + i - 1]$.

1 Формується траєкторна матриця X^* фрагмента часового ряду.

2 Обчислюється матриця $R = X^* X^{*T}$.

3 Знаходяться власні числа $\lambda_1, \dots, \lambda_L$ матриці R .

4 Всі власні числа розташовуються в порядку, що не зростає: $(\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0)$.

5 Набір власних чисел $(\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L \geq 0)_i$ заноситься на зберігання до бази даних.

6 Знаходяться власні вектори $U_1, \dots, U_L$ матриці R розмірністю $(L \times L)$, відповідні власним числам $\lambda_1, \dots, \lambda_L$.

7 Обчислюються сингулярні числа $\sqrt{\lambda_j}$, де $j = 1, \dots, d$

8 Визначається кількість ненульових власних чисел

$$d = \max\{j, \lambda_j > 0\}.$$

9 Знаходяться факторні вектори:

$$V_j = \frac{1}{\sqrt{\lambda_j}} X^{*T} U_j, \text{ де } j = 1, \dots, d.$$

10 Формується набір власних трійок сингулярного розкладання для i -го етапу аналізу: $\{\sqrt{\lambda_j}, U_j, V_j\}_i$ де $j = 1, \dots, d$.

11 Набір власних трійок $\{\sqrt{\lambda_j}, U_j, V_j\}_i$ заноситься на зберігання до бази даних.

Крок 10. Якщо $i > 0$, то проводиться експрес-аналіз виявлення моменту часу структурних змін, навіщо здійснюється перехід до Кроку 11, інакше перехід до Кроку 17.

Крок 11. Виконується перевірка поточного набору власних чисел $\{\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L\}_i$ який порівнюється з набором власних чисел $\{\lambda_1 \geq \dots \geq \lambda_L\}_{i-1}$, отриманим під час попереднього розташування діапазону перегляду. Якщо $\{\lambda_j\}_i \neq \{\lambda_j\}_{i-1}$, то здійснюється перехід до Кроку 12, інакше перехід до Кроку 17.

Крок 12. Проводиться ЕКСПРЕС-АНАЛІЗ. Якщо є невиконання рівності $\{\lambda_j\}_i \neq \{\lambda_j\}_{i-1}$, то виконуємо наступне:

1 Якщо збільшилася кількість значних власних чисел, то видається повідомлення про те, що в діапазон перегляду потрапив момент часу (t_p - час «розладки») появи в структурі ряду нової структурної компоненти (або кількох нових структурних компонентів).

2 Якщо зменшилася кількість значимих власних чисел, то видається повідомлення у тому, що у діапазон перегляду потрапив час (t_p) зникнення з часового ряду структурних компонентів (або декількох структурних компонентів).

3 Якщо змінилися значення окремих власних чисел, видається повідомлення про те, що в діапазон перегляду потрапив момент часу (t_p) зміни рівня значущості відповідних структурних компонентів часового ряду.

4 Якщо зафіксовано появу групи ненульових власних чисел із рівнем значимості нижче заданого, то видається повідомлення про те, що в поточному діапазоні перегляду зафіксовано появу «розладочної» компоненти, що свідчить про те, що в діапазон перегляду потрапив момент часу (t_p) появи структурних змін у часовому ряді.

Крок 13. Якщо необхідно проведення детального аналізу виявлення характеру структурних змін, здійснюється перехід до Кроку 14, інакше до Кроку 15.

Крок 14. Проводиться ДЕТАЛЬНИЙ АНАЛІЗ фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду з межами. $[i; D + i - 1]$ виявлення характеру структурних змін.

Крок 15. Якщо необхідно проведення додаткового аналізу, для уточнення моменту виникнення структурних змін у часовому ряді, то здійснюється перехід до Кроку 16, інакше перехід до Кроку 17.

Крок 16. Проводиться ДОДАТКОВИЙ АНАЛІЗ фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду з межами. $[i; D + i - 1]$.

Крок 17. Здійснюється перевірка умови досягнення останнього елемента x_{N-1} часового ряду правою межею діапазону перегляду. Тобто якщо умова $i > N - D$ виконується, здійснюється перехід до Кроку 19, інакше до Кроку 18.

Крок 18. Межі діапазону перегляду зміщуються праворуч на один елемент часового ряду: $i := i + 1$. Здійснюється перехід до Кроку 8.

Крок 19. Кінець алгоритму.

Блок-схема описаного алгоритму представлена на рис. 3.6

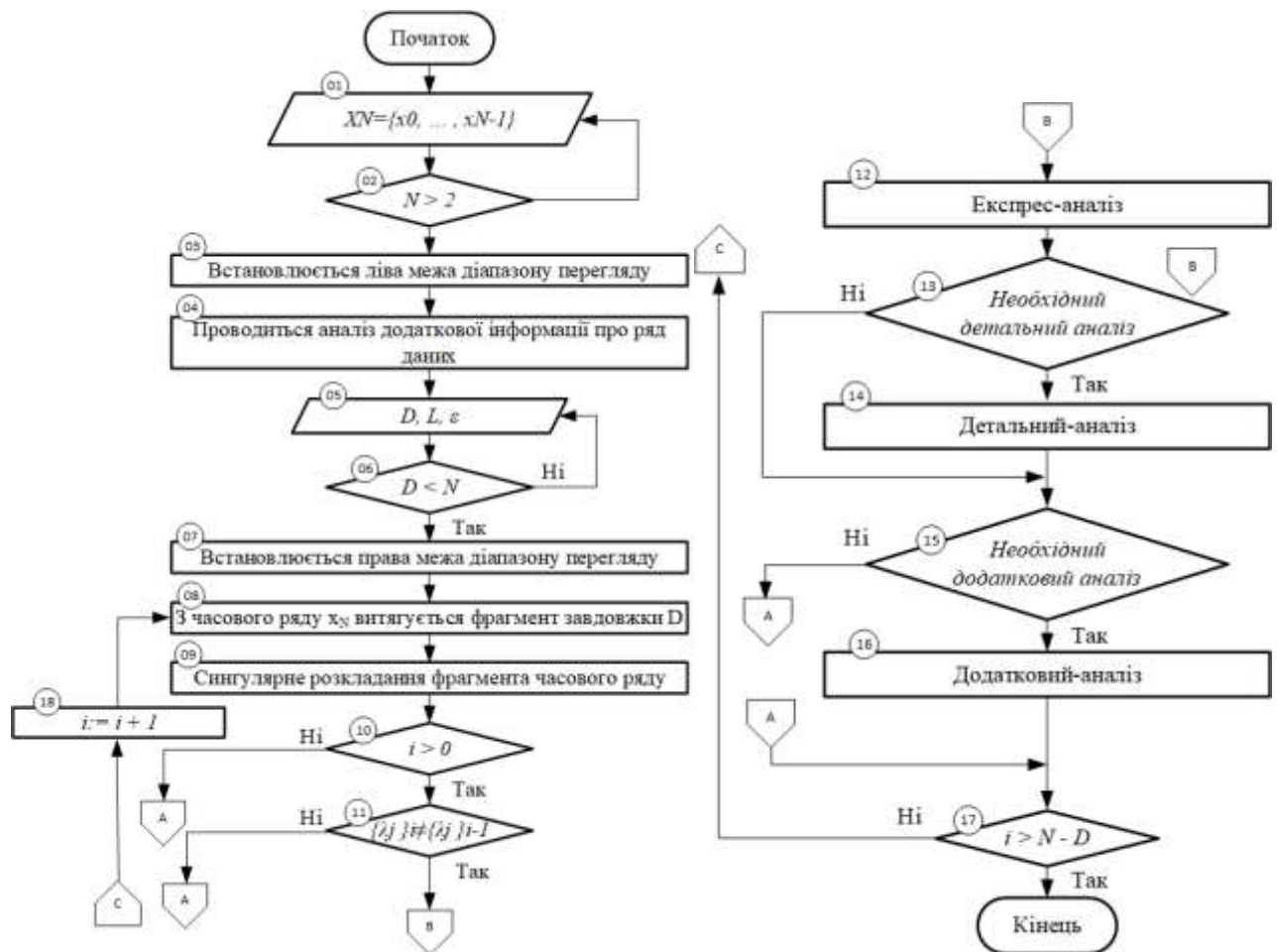


Рисунок 3.6 – Блок-схема алгоритму застосування інформаційних технологій для виявлення та аналізу структурних змін часового ряду кінцевої довжини (з використанням сингулярно-спектрального аналізу)

3.6 Перевірка алгоритму виявлення гармонічної складової на основі сингулярно-спектрального аналізу

Практичну реалізацію алгоритму виявлення гармонічної складової було проведено на реальних даних споживання електроенергії Олексіївським житловим масивом міста Харкова за різні періоди останніх десяти років.

Дослідження проводилися з метою виявлення моментів та характеру змін низки даних споживання електроенергії, що свідчать про зміни якості тепlopостачання побутових споживачів.

3.6.1 Дані для використання алгоритму

Було обрано дані по обсягам теплопостачання і обсягам електроспоживання у період 01.09.2020-01.09.2021. Довжина часового ряду при цьому склала $N=366$ (точка з номером 1 відповідає даті 01.09.2020, а точка з номером 366 - даті 01.09.2021).

На рис. 3.7 представлені дані про споживання електроенергії і дані щодо добової подачі теплової енергії системою централізованого теплопостачання.

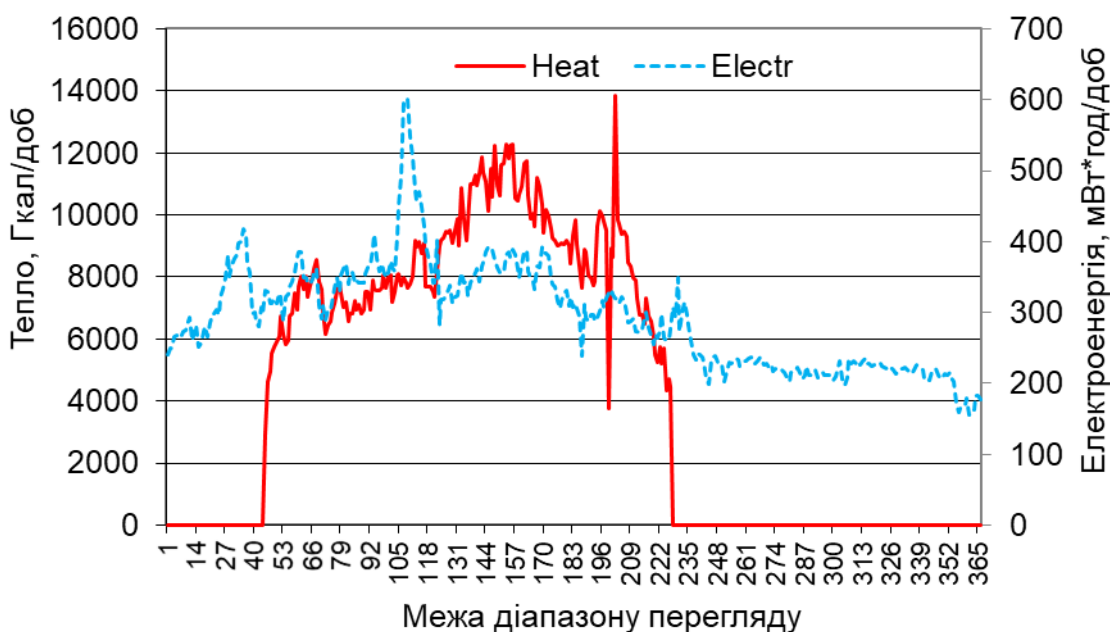


Рисунок 3.7 – Споживання електроенергії і теплової енергії Олексіївським житловим масивом м. Харкова за рік (у період з 01.09.2020 по 01.09.2021)

На рис. 3.7. точка 45 відповідає даті 15.10.2020 - початок опалювального періоду, точка 227 відповідає даті 15.04.2021 - закінчення опалювального періоду.

Зміни зовнішньої температури за вказаний період часу показані на рис. 3.8.

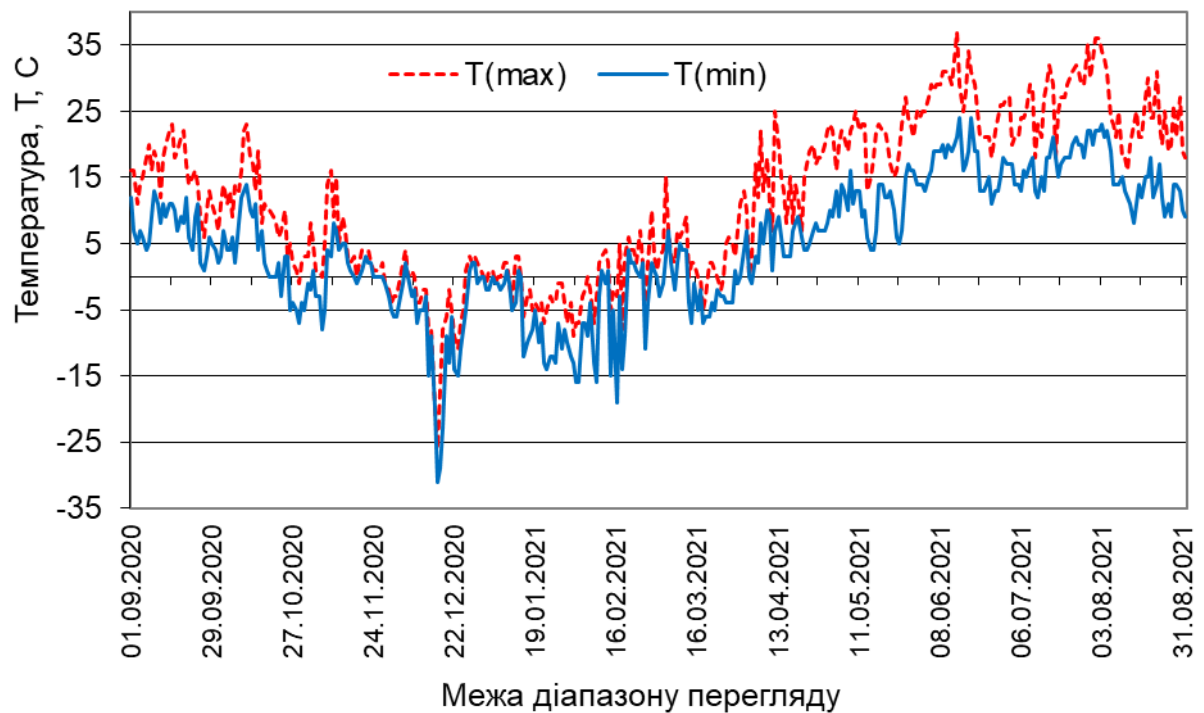


Рисунок 3.8 – Зовнішня температура (min і max) у період з 01.09.2020 по 01.09.2021

Подані на рис. 3.7, та рис. 3.8 вихідні для дослідження дані отримані на Харківській ТЕЦ -5.

Аналіз структурних змін досліджуваного часового ряду за запропонованою методикою було проведено у три етапи:

1. Експрес-аналіз.
2. Детальний аналіз.
3. Додатковий аналіз.

3.6.2 Експрес-аналіз

Для здійснення експрес-аналізу проводились спостереження за змінами значень власних чисел λ_i коваріаційної матриці, отриманих при сингулярному розкладанні фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду, при його русі.

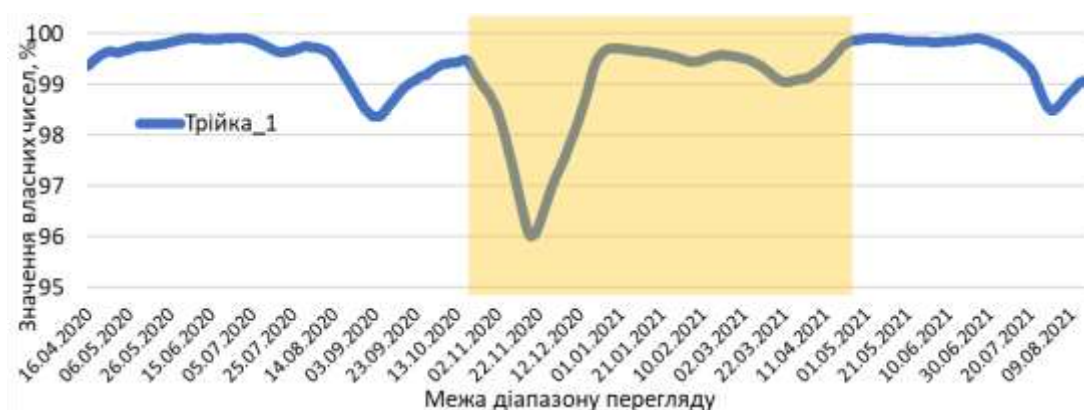
Дослідження проводились при діапазоні перегляду $D=60$ (два місяці), довжині вікна $L=30$ (один місяць) (довжина ряду $N=366$) за допомогою програмного продукту [133] (математичний метод сингулярно-спектрального аналізу був застосований без центрування та нормування). Динаміка значень власних чисел представлена на рис. 3.9.

На рис. 3.9 межі діапазону перегляду з 01.09.2020 по 30.10.2020 відповідають аналізу фрагмента часового ряду в період (1-60) для кількості елементів фрагмента ряду $D=60$, наступний крок охоплює діапазону перегляду з 02.09.2020 до 31.10.2020 що відповідає фрагменту часового ряду в період (2-61) і т.д. На кожному з наступних кроків межі діапазону перегляду зміщується на один елемент часового ряду.

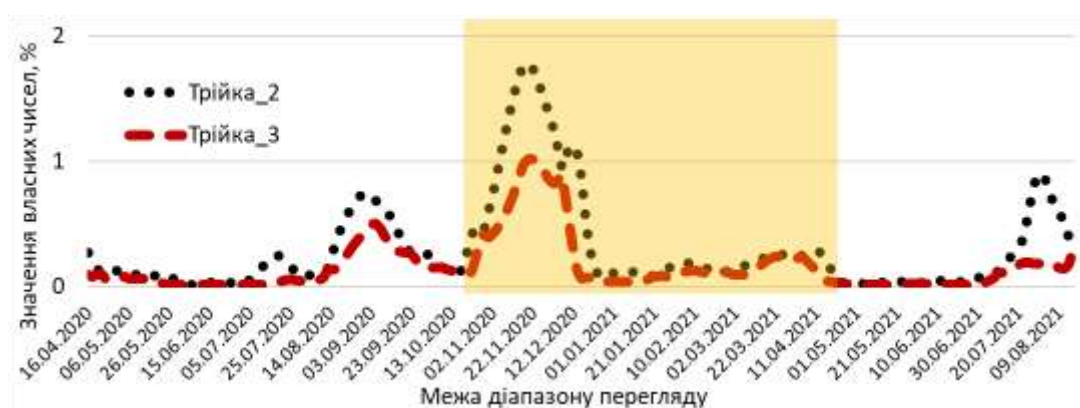
Слід зазначити виявлені моменти (і періоди) змін значень сингулярних чисел $\sqrt{\lambda_i}$ у своїх трійках сингулярного розкладання (і, відповідно, λ_i - власних чисел матриці $R = XX^T$) при русі діапазону перегляду довжиною $D=60$ (рис. 3.9), які відповідають змінам різних зовнішніх факторів, що впливають на формування часового ряду даних споживання електроенергії побутовими споживачами.

Коли діапазон перегляду містить фрагменти ряду, що відповідають періоду без використання централізованого опалення, а саме календарні інтервали [01.09.2020-14.10.2020] - [16.04.2021-01.09.2021], змін у значеннях власних чисел (виражених у відсотках) практично не спостерігається (рис. 3.9). При цьому значення власного числа, що відповідає першій власній трійці (і відповідно першій головній компоненті), досягають своїх максимальних значень (близьких до 100%), а значення власних чисел, відповідних другий і третій власним трійкам (і відповідно другий і третій головним компонентам), досягають своїх мінімальних значень (близьких до 0%).

Найбільш істотні зміни у значеннях власних чисел спостерігаються при діапазоні перегляду на календарному інтервалі [15.10.2020-15.04.2021], що відповідає опалювальному періоду (підкрашена зона на рис. 3.7).



а)



б)

Рисунок 3.9 – Динаміка власних чисел (довжина діапазону перегляду $D=60$)

а) 1-ї власної трійки

б) 2-ї та 3-ї власних трійок

Проведений експрес-аналіз дає можливість виявлення точок (і інтервалів) структурних змін часового ряду, а також показує, що на формування ряду даних споживання електроенергії побутовими споживачами в літній період впливає лише один фактор, а в період опалювального сезону впливають інші фактори, причому в період суттєвого зниження зовнішньої температури їх вплив значний.

3.6.3 Детальний аналіз.

У добове споживання електроенергії побутовими споживачами (рис. 3.7) закладено її використання для освітлення та побутових потреб. На кожну із складових, у свою чергу, впливає безліч факторів, а саме: погодні умови, а також

соціальні, фінансові та інші фактори. Таким чином, часовий ряд даних споживання електроенергії побутовими споживачами має складну структуру і може бути розкладений на структурні компоненти для подальшого детального аналізу.

Наведено розкладання часового ряду споживання електроенергії на складові структурні компоненти методом сингулярно-спектрального аналізу за допомогою програмного продукту [133]. Що дозволило витягти першу, другу і третю компоненти. Вилучена з низки даних споживання електроенергії перша структурна компонента, що має найбільший відсоток значущості (97,724%) представлена на рис. 3.10.а. При порівнянні першої компоненти з графіком, побудованим згідно з математичними викладками щодо формування нормального зимово-літнього споживання електроенергії (рис. 3.11), викладеним у [132], можна зробити висновок, що виділена структурна компонента формується під впливом фактора "довжина світлового дня" і відповідає усередненому річному споживанню електроенергії побутовими споживачами. Тобто вона не включає використання електроенергії для обігріву електронагрівальними приладами.

Проаналізувавши характер поведінки другої та третьої вилучених компонентів, можна зробити припущення про те, що на їх формування впливають такі фактори, як якість теплопостачання, а також зовнішня температура.



а)



б)

Рисунок 3.10 – Вилучення з низки даних споживання електроенергії структурних компонентів (період з 01.09.2020 по 01.09.2021)

а) вилучення першої компоненти (97,724%)

б) залишки другої (0,877%) і третьої компонент (0,235%)

Тобто у літній період формування низки даних споживання електроенергії побутовими споживачами зумовлює лише перша компонента, має максимально можливий рівень значущості. При цьому рівень значимості другої та третьої компоненти і, відповідно, другого та третього власних чисел рис. 3.9 б), обумовлених впливом факторів зовнішньої температури та якості теплопостачання, мінімальні (близькі до 0%) і практично не змінюються. Тобто у літній період вони не впливають на формування низки даних споживання електроенергії побутовими споживачами.

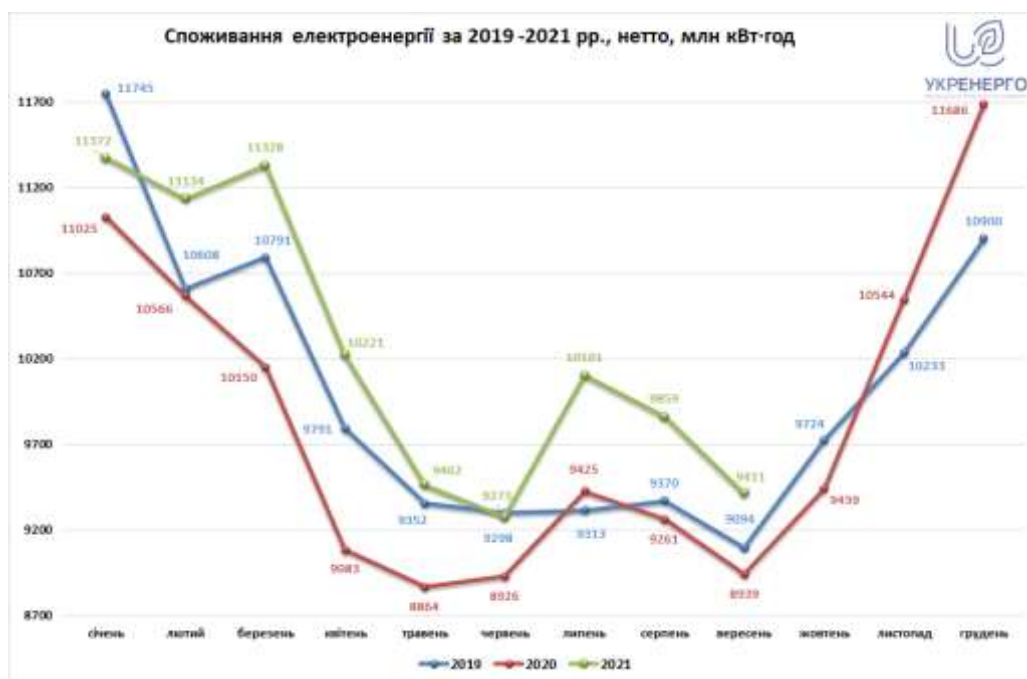


Рисунок 3.11 – Типова крива споживання електроенергії зима літо [132]

При настанні опалювального періоду та зниження зовнішньої температури змінюється структура ряду даних споживання електроенергії побутовими споживачами. При цьому знижується рівень значущості першої компоненти, обумовленої впливом фактора "довжина світлового дня", що можна спостерігати по зменшенню значень першого власного числа, відповідного першої власної трійці (рис. 3.9 а), і підвищується рівень значимості другий і третьої компонентів, що можна спостерігати за збільшенням. 3.9 б).

Враховуючи описані структурні зміни та зіставивши їх з даними про кількість тепла, що відпускається (рис. 3.7) і зовнішньою температурою (рис. 3.8) в цей період, можна відзначити наступне: структурні зміни часових рядів споживання електричної енергії побутовими споживачами на тлі значного зниження зовнішньої температури свідчить про недостатній рівень теплопостачання в зазначений період.

3.6.4 Додатковий аналіз (дослідження низки залишків).

Для уточнення діагностики моментів структурної "розладки" часового ряду даних споживання електроенергії здійснюємо додатковий аналіз. Для цього проводиться аналіз низки залишків після видалення першої компоненти, що була пояснена в детальному аналізі. Аналіз низки залишків дозволить отримати додаткову інформацію про моменти часу структурних змін часового споживання електроенергії побутовими споживачами. Графік залишків теплової (Ost_Heat) і електричної енергії (Ost_EE_G) представлено на рис. 3.12.

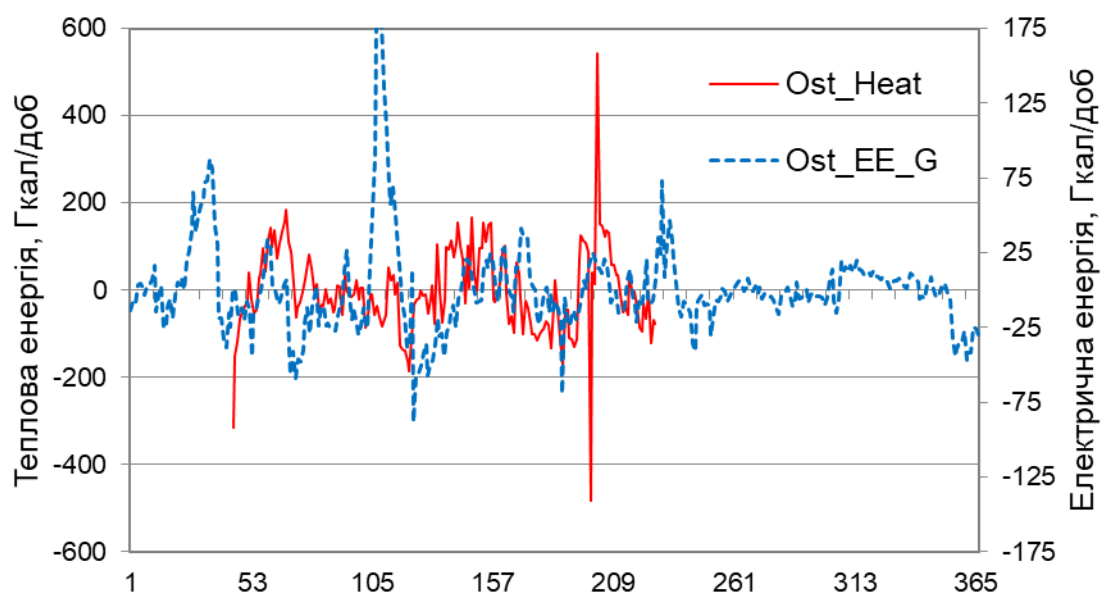


Рисунок 3.12 – Графік залишків теплової і електричної енергії перерахованої в Гкал/доб за різними масштабними сітками

На графіку 3.13 зображено залишки ряду споживання електричної енергії (Ost_EE) в порівнянні із зовнішньою температурою ($T_{\min}$), діапазон з точки 1 (01.09.2020) до точки 44 (14.10.2020), опалювальний сезон починається з точки 45 (15/10/2020).

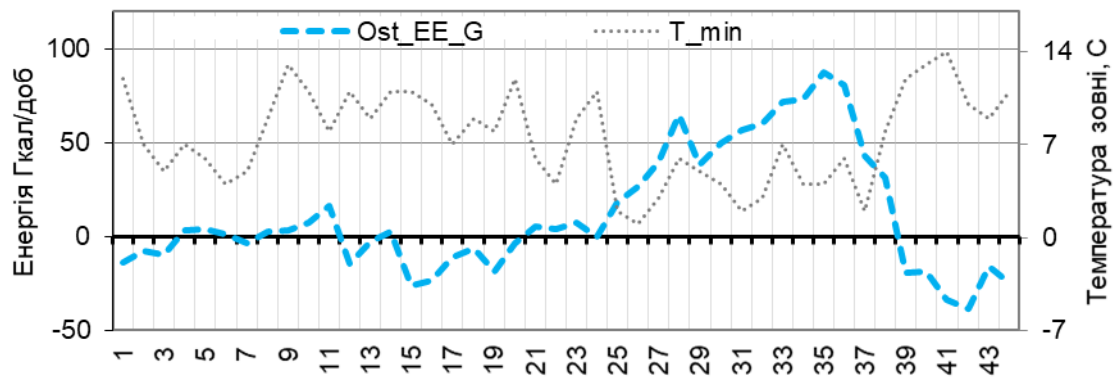


Рисунок 3.13 – Графік залишків ряду споживання електричної енергії (Ost_EE) в порівнянні із зовнішньою температурою (T_min), до початку опалювального сезону

На графіку 3.13 видно зміну у структурі низки т.8-11 (08.09-11.09), т.25-38 (25.09-08.10), впливає лише зовнішня температура повітря (T_min).

На рис. 3.14 показано місяць опалювального сезону з т.54 (24.10.2020) по т.84 (23.11.2020), але тим не менше сплески надспоживання електричної енергії мають місце (точки 57-62, точки 67-68).

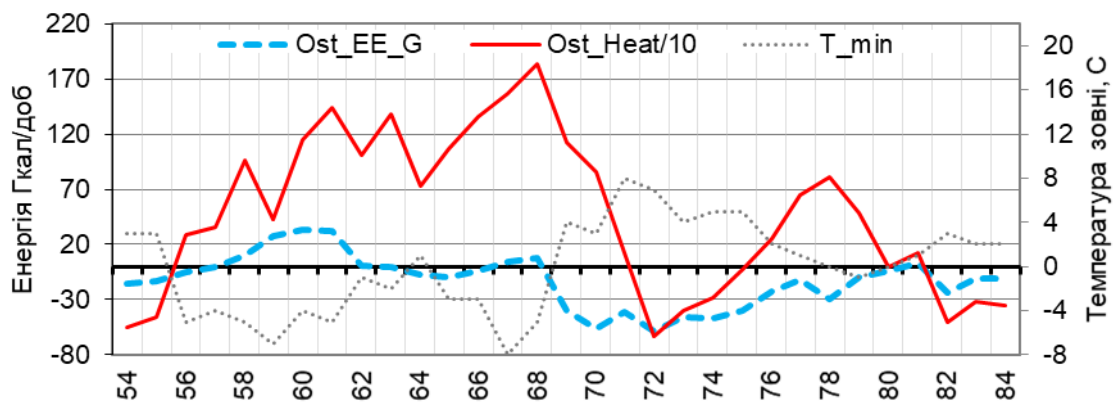


Рисунок 3.14 – Опалювальний сезон розпочато

На графіку електроспоживання (рис. 3.15) добре видно, як при зниженні температури з точки 104 (13.12.2020) по точку 117 (26.12.2020) населенню не вистачало тепла від мережі і споживачі використовували електричний підігрів помешкань.

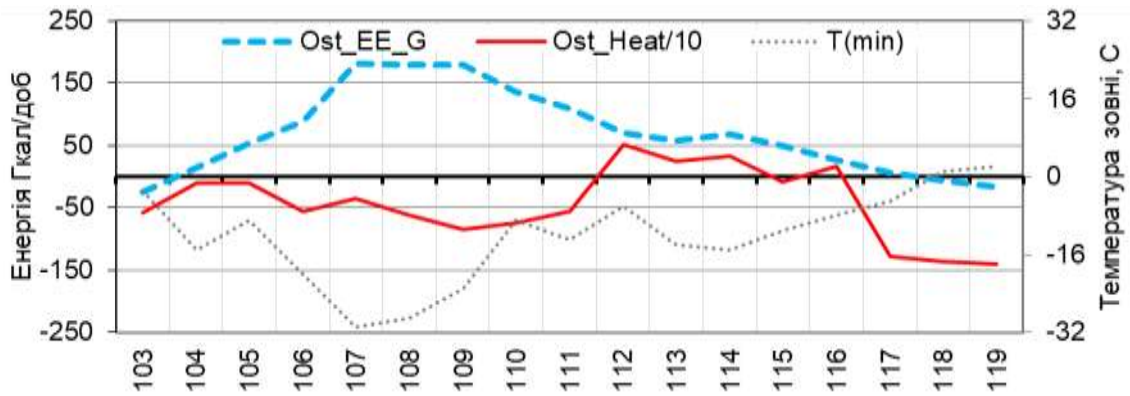


Рисунок 3.15 – Недостача теплової енергії компенсується надспоживанням електричної енергії

Під час припинення подачі тепла в мережу на графіку електроспоживання бачимо сплеск споживання, з точки 227 (15.04.2021) по точку 236 (24.04.2021) (рис. 3.16)

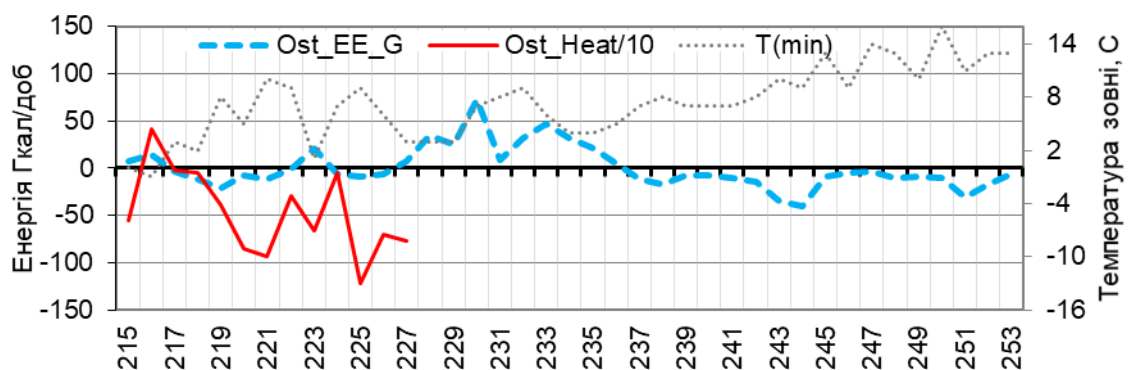


Рисунок 3.16 – Закінчення опалювального сезону

За запропонованим алгоритмом проводиться спостереження явищ в електричній мережі. На їх проявах виробляються коригуючі команди для диспетчерського пункту теплової мережі. По змінам надспоживання електричної енергії (маркером якої є наявність гармонічних збурень в мережі) можна визначити початок додаткової подачі теплової енергії в мережу, а по величині споживання (що показують залишки компоненти) можна визначити величину додаткового теплового потоку. Споживання теплової енергії значно більше за

обсягами ніж електричної. Тому розрахована кількість додатково необхідної теплової енергії буде незначною (рис. 3.17). На рисунку 3.17 можна побачити тепловий потік із коригуючою величиною якої немає на рисунку 3.15. Але тим не менш такого корегування теплового потоку буде достатньо для припинення надспоживання електричної енергії а відповідно і припинення гармонічної складової в електричній мережі.

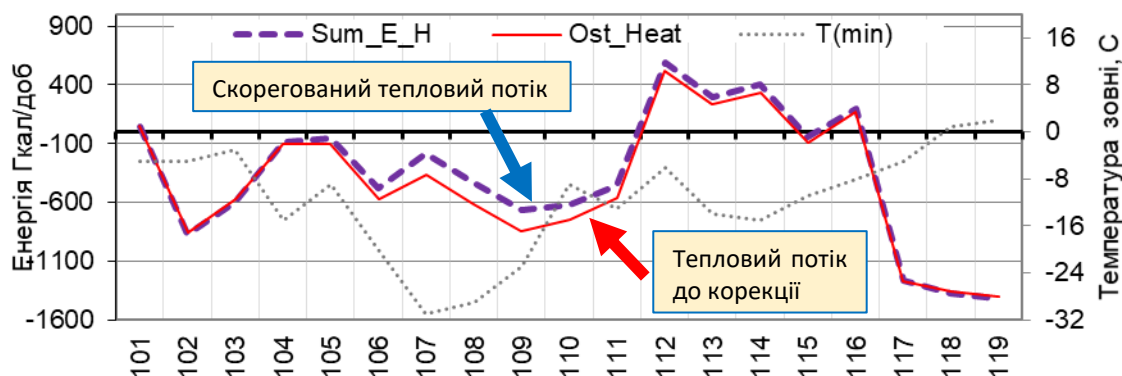


Рисунок 3.17 – Приклад подачі теплового потоку за командою виправлення надспоживання електричної енергії

Застосування запропонованого алгоритму дозволяє діагностувати структурні зміни в ряді даних споживання електроенергії, й дає можливість перетворення інформації про кількість споживаної електроенергії в інформацію про якість теплопостачання.

Висновки по розділу 3

Описано заходи по зменшенню гармонічної складової в електричній мережі.

Обрано вплив на появу гармонічних складових шляхом зменшення режимів надспоживання електричної енергії.

Встановлено, що недостатня якість теплопостачання спричиняє використання побутовими споживачами електрообігріву, що призводить до надспоживання електроенергії та погіршення її якості. Показано можливість використання надспоживання електроенергії як індикатора дефіциту теплової енергії.

Запропоновано підхід до моніторингу якості теплопостачання на основі аналізу взаємопов'язаного споживання енергоресурсів та розроблено алгоритм виявлення структурних змін часових рядів із використанням сингулярно-спектрального аналізу.

Перевірка алгоритму на реальних даних електроспоживання Олексіївського житлового масиву м. Харкова підтвердила його працездатність і дозволила виявити періоди надспоживання електроенергії, пов'язані з недостатнім рівнем теплопостачання. Запропонований підхід дає змогу формувати коригувальні сигнали для управління тепловими мережами, зменшувати надспоживання електроенергії та, як наслідок, знижувати рівень гармонічних спотворень в електричних мережах.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Головним чином як для споживачів, так і для енергопостачаючої компанії погіршення якості електричної енергії має економічний вимір. Проблема досліджувалася науковцями в Україні, наприклад, такими як Самойленко І.О., Гриб О.Г., Сендерович Г.А., і іншими [134, 135].

Наявність вищих гармонік в мережі призводить до збільшення струмів конденсаторних установок та ємнісних елементів у колах живлення обладнання споживачів, що стає причиною додаткових втрат потужності, перегріву, передчасного старіння та навіть виходу з ладу [136, 137, 138]. Також вищі гармонічні складові збільшують втрати у серцевинах трансформаторів, погіршують точність вимірювання систем обліку, викликають порушення у роботі захисних пристроїв або чутливої до якості електроенергії апаратури споживачів [139, 140].

За співавторством Самойленко І.О., Гриб О.Г., Сендерович Г.А. була розроблена типова методика по обрахуванню збитків від неякісної електричної енергії [141].

4.1 Розрахунок економічних збитків від гармонічних складових в електричній мережі комунального підприємства «Харківські теплові мережі»

З метою визначення збитків, зумовлених відхиленнями показників якості електричної енергії, проведено комплексне обстеження підприємства. Розглядалися підрозділи підприємства, що надають тепlopостачання тільки одному району міста, для якого було отримано дані по електроспоживанню. Було зібрано вихідні економічні дані, зокрема щодо структури та вартості основних фондів, фонду оплати праці, режиму роботи підприємства та чисельності персоналу за виробничими підрозділами і змінами.

Вплив якості електроенергії на величину та структуру збитків підприємства досліджувався для часових інтервалів 30, 60 і 120 хв. Для кожного інтервалу часу, пов'язаного з порушенням якості електроенергії, визначалися фактичний простій підрозділу підприємства та відповідне перевищення тривалості простою над часом порушення електропостачання.

Збитки, пов'язані з оплатою вимушеного простою персоналу та збільшенням витрат на понаднормові роботи, визначалися з урахуванням можливості тимчасового залучення частини працівників до альтернативних виробничих завдань у період порушення електропостачання, спричиненого низькою якістю електричної енергії.

Розрахунок проводиться наступним чином;

1 Визначається оцінка технічного збитку, зумовленого відхиленням показників якості електричної енергії від нормованих значень.

2 Визначається вартість додатково поданої до мережі теплової енергії, необхідної для покращення показників якості енергопостачання.

3 Визначаються сумарні витрати, необхідні для зменшення гармонічної складової в електричній мережі.

4.1.1 Розрахунок збитку від зниження якості електроенергії

Відповідно до методики [141] проведено розрахунок величини економічного збитку від зниження якості електроенергії для району міста, де проводилися заміри якості електричної енергії (дані замірів представлені в додатку Б). На підстанції проведено контроль ПЯЕЕ, за результатами якого зазначено, що математичні очікування ПЯЕЕ мають такі значення: коефіцієнт несиметрії напруг $\varepsilon_U = 0,22$; відносні напруги вищих гармонік $U_3 = 2,2643$; $U_5 = 3,4233$; $U_7 = 1,0047$; $U_9 = 0,7730$; $U_{11} = 0,6767$; $U_{13} = 0,2743$; $U_{15} = 0,4003$; $U_{17} = 0,8143$; $U_{19} = 0,6333$

В таблиці 4.1, наведено техніко-економічні дані електрообладнання, встановленого на цих підстанціях і підрозділах підприємства.

Таблиця 4.1 – Техніко-економічні дані електроустаткування

№ п/п	Найменування електроустаткування	Кількість, шт	Потужність, кВт	Ціна, грн (за одиницю)	Встановлена номінальна потужність, кВт	Вартість, тис. грн.	Кількість годин роботи
1	Насоси на асинхронному двигуні	19	1,5	62685,00	28,500	1191,02	8760
2	Освітлювальні приймачі, у т.ч.:						
	- лампи накаливання	38	75	40,00	2,850	1,52	7700
	- газорозрядні лампи	418	36	84,00	15,048	35,11	3600

Визначимо додаткові втрати активної потужності в електрообладнанні системи, обумовлені несиметрією та несинусоїдальністю напруги.

Знаходимо значення коефіцієнтів $k' = 0,5$; $k'' = 0,3$.

Визначаємо додаткові втрати активної потужності в електричному обладнанні:

$$\Delta P = \left(k' \cdot \varepsilon_U^2 + k'' \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{1 + 0,05 \cdot v^2}{v \cdot \sqrt{v}} \cdot U_v^2 \right) \cdot S_H$$

де ε_U – коефіцієнт несиметрії напруги, рівний відношенню модуля напруги зворотної послідовності на затискачах споживача до номінальної напруги $\varepsilon_U = \frac{U_2}{U_n}$, в.о.;

U_v – відносне значення модуля напруги v -ої гармоніки на затискачах споживача, в.о.;

S_H – номінальна повна потужність електрообладнання, кВА;

k' , k'' – коефіцієнти, що визначаються для автотрансформаторів.

$$\Delta P = \left[0,5 \cdot 0,22^2 + 0,3 \cdot \left(\frac{1 + 0,05 \cdot 3^2}{3 \cdot \sqrt{3}} 2,2643^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 5^2}{5 \cdot \sqrt{5}} 3,4233^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 7^2}{7 \cdot \sqrt{7}} 1,0047^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 9^2}{9 \cdot \sqrt{9}} 0,7730^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 11^2}{11 \cdot \sqrt{11}} 0,6767^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 13^2}{13 \cdot \sqrt{13}} 0,2743^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 15^2}{15 \cdot \sqrt{15}} 0,4003^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 17^2}{17 \cdot \sqrt{17}} 0,8143^2 + \frac{1 + 0,05 \cdot 19^2}{19 \cdot \sqrt{19}} 0,6333^2 \right) \right] \cdot 28,5 = 38,86 \text{ кВт}$$

Складова економічного збитку, обумовлена додатковими втратами активної потужності становить:

$$З_{ДВ} = 0,01 \cdot B_E \cdot \sum_{i=1}^n \Delta P_i \cdot T_i,$$

де: B_E – вартість 1 кВт·год. втрат електроенергії, коп./кВт·год;

ΔP_i – додаткові втрати активної потужності в i -й групі однорідних елементів, кВт;

T_i – число годин роботи в році i -ї групи однорідних елементів, год./рік;

n – число аналізованих груп однорідних елементів.

$$З_{ДВ} = 0,01 \cdot 6,9 \cdot 38,86 \cdot 8760 = 234,89 \text{ тис. грн/рік.}$$

Визначаємо зниження терміну служби електрообладнання для розглянутих підстанцій, обумовленого несиметрією та несинусоїдальністю напруг. Для розрахунку кратності зниження терміну служби асинхронних двигунів вибираємо значення коефіцієнтів $d' = 338$, $d'' = 113$.

Визначаємо, коефіцієнт спотворення для асинхронних двигунів:

$$k_{\text{спом}} = d' \cdot \varepsilon_U^2 + d'' \cdot \sum_{v=2}^{\infty} \frac{U_v^2}{v \cdot \sqrt{v}},$$

де: d' , d'' – коефіцієнти, що визначаються для асинхронних двигунів і синхронних машин.

$$k_{\text{спом}} = 338 \cdot 0,22^2 + 113 \cdot \left(\frac{2,2643^2}{3 \cdot \sqrt{3}} + \frac{3,4233^2}{5 \cdot \sqrt{5}} + \frac{1,0047^2}{7 \cdot \sqrt{7}} + \frac{0,7730^2}{9 \cdot \sqrt{9}} + \frac{0,6767^2}{11 \cdot \sqrt{11}} + \frac{0,2743^2}{13 \cdot \sqrt{13}} + \frac{0,4003^2}{15 \cdot \sqrt{15}} + \frac{0,8143^2}{17 \cdot \sqrt{17}} + \frac{0,6333^2}{19 \cdot \sqrt{19}} \right) = 2,535.$$

Знаходимо кратність зниження терміну служби електрообладнання:

$$\gamma = e^{k_{\text{спом}}} = e^{2,535} = 12,617.$$

Значення щорічних витрат на амортизацію та обслуговування асинхронних двигунів становить 0,1262.

Використовуючи дані табл. 4.1, визначаємо приведені витрати на асинхронні двигуни:

$$B_I = E_H \cdot K_I + BE_I,$$

де: E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік. В нашому випадку приймаємо 0,15;

K_I – вартість насосів з асинхронними двигунами, тис грн.

BE_I – щорічні експлуатаційні витрати, грн/рік.

$$B_I = 0,15 \cdot 1191,02 + 0,1262 \cdot 1191,02 = 328,92 \text{ тис. грн/рік}$$

Визначаємо складову економічного збитку, обумовлену зниженням терміну служби електрообладнання:

$$Z_{TC} = \sum_{i=1}^n B_i \cdot \left(\frac{\gamma_i - 1}{1 + E_H \cdot T_{Hi}} \right),$$

де: B_i – приведені витрати на i -у групу однорідних елементів, грн/рік;

γ_i – кратність зниження терміну служби для i -ї групи однорідних елементів,

в.о.;

E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік;

T_{Hi} – номінальний термін служби для i -ї групи однорідних елементів, рік.

$$Z_{TC} = 328,92 \cdot \frac{12,617 - 1}{1 + 0,15 \cdot 25} = 804,42 \text{ тис. грн/рік.}$$

Визначимо складову економічного збитку, що обумовлена зниженням ефективності використання передавальних елементів електричної мережі. Для спрощення не розглядаємо вплив від несиметрії. Тобто $Z_{EV} = 0$ грн./рік.

Економічний збиток від несиметрії та несинусоїдальності напруги:

$$Z_H = Z_{ДВ} + Z_{TC} + Z_{EV},$$

де: $Z_{ДВ}$ – складова, обумовлена додатковими втратами активної потужності;

Z_{TC} – складова, обумовлена зниженням терміну служби електрообладнання;

Z_{EV} – складова, обумовлена зниженням ефективності використання передавальних елементів електричної мережі.

$$Z_H = 234,89 + 804,42 + 0 = 1039,31 \text{ тис. грн./рік.}$$

Визначаємо економічний збиток від відхилень напруги для освітлювальних приладів на досліджуваних підстанціях, якщо освітлювальне навантаження рівномірно розподілено по фазах, а математичні очікування відхилень напруги, відповідно до вимірювань, становлять: $U_A = 0,0384$; $U_B = 0,0577$; $U_C = 0,0600$.

Визначаємо значення коефіцієнтів економічної невідповідності для груп освітлювального навантаження, величини яких представлені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 – Техніко-економічні дані освітлювальних приймачів приміщень підприємства

Освітлювальні приймачі	Кіль- кість, шт	Потуж- ність, Вт	Ціна, грн	Встанов- лена номіналь- на потужн. кВт	Вартість, тис.грн.	Кількість годин роботи	а	с
Лампи розжарювання	38	75	40	2,85	1,52	7700	0,0953	0,0339
Газорозрядні лампи	418	36	84	15,048	35,112	3600	0	0,0203

Визначаємо величину економічних збитків від відхилень напруги для освітлювальних приймачів:

$$Z_{відх} = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^2 P_{освіj} \cdot T_{освіj} \cdot (a_j \cdot u_i^2 + c_j \cdot u_i),$$

де: $P_{освіj}$ – номінальна активна потужність штучного джерела освітлення j -ї групи, підключеної до i -ї фази, кВт;

$T_{освіj}$ – число годин роботи в році освітлювального навантаження j -ї групи, підключеної до i -ї фази год./ рік;

a_j, c_j – коефіцієнти економічної невідповідності, визначаються для різних груп штучних джерел освітлення, грн/кВт·год.;

u_i – відносне значення відхилення напруги в i -й фазі електричної мережі, в.о.

$$\begin{aligned}
 Z_{відх} = & \left[\frac{1}{3} \cdot (0,0953 \cdot 0,0384^2 + 0,0339 \cdot 0,0384) + \frac{1}{3} \right. \\
 & \cdot (0,0953 \cdot 0,0577^2 + 0,0339 \cdot 0,0577) + \frac{1}{3} \\
 & \cdot (0,0953 \cdot 0,0600^2 + 0,0339 \cdot 0,0600) \left. \right] \cdot 1,52 \cdot 7700 + \frac{1}{3} \cdot 0,0203 \\
 & \cdot (0,0384 + 0,0577 + 0,0600) \cdot 35,11 \cdot 3600 = 101,79 \text{ тис. грн/рік.}
 \end{aligned}$$

Сумарний щорічний економічний збиток від зниження якості електроенергії становитиме:

$$З_я = З_H + З_{ВДХ} = 1039,31 + 101,79 = 1141,10 \text{ тис. грн/рік.}$$

Економічний збиток, обумовлений впливом низької якості електричної енергії на покази лічильників, визначаємо наступним чином:

Визначаємо значення електроенергії, врахованої вимірювальним комплексом з похибкою пов'язаною із наявністю гармонічної складової в мережі:

$$\Delta W_i = W_{n(o)} - W_i ,$$

де $W_{n(o)}$ – сумарна кількість електричної енергії що була отримана із мережі на електроприймачі за звітний період (1 рік).

W_i – кількість електроенергії, врахованої i -м вимірювальним комплексом за звітний період;

Загальна кількість спожитої електричної енергії всіма електроспоживачами підприємства:

$$W_{n(o)} = \sum_{i=1}^n (P_i \cdot T_i) ,$$

де: P_i – встановлена активна потужність i -го типу електроспоживача, кВт

T_i – кількість годин роботи i -го типу електроспоживача за рік, години

$$W_{n(o)} = 28,50 \cdot 8760 + 2,85 \cdot 7700 + 15,05 \cdot 3600 = 325777,8 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

W_i – суммарна кількість електричної енергії що була зафіксована приладами обліку за період 1 рік. Враховано 297760,9 кВт*год/рік

$$\Delta W_i = W_{n(o)} - W_i = 325777,8 - 297760,9 = 28016,9 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік.}$$

Економічний збиток, обумовлений впливом низької якості електричної енергії на покази лічильників, становитиме:

$$Z_{\text{л}} = B_E \cdot \sum_{i=1}^k \Delta W_i = 6,9 \cdot 28016,9 = 193,32 \text{ тис. грн/рік.}$$

Значення технічного збитку, обумовленого відхиленням показників якості електричної енергії від нормованих значень:

$$Z_{\text{т}} = Z_{\text{я}} + Z_{\text{л}} = 1141,1 + 193,3 = 1334,4 \text{ тис. грн/рік.}$$

4.1.2 Розрахунок додаткового обсягу теплової енергії для забезпечення умови зменшення гармонічної складової

На графіку залишків ряду електричної енергії можна побачити як позитивні, так і негативні сплески (рис. 4.1).

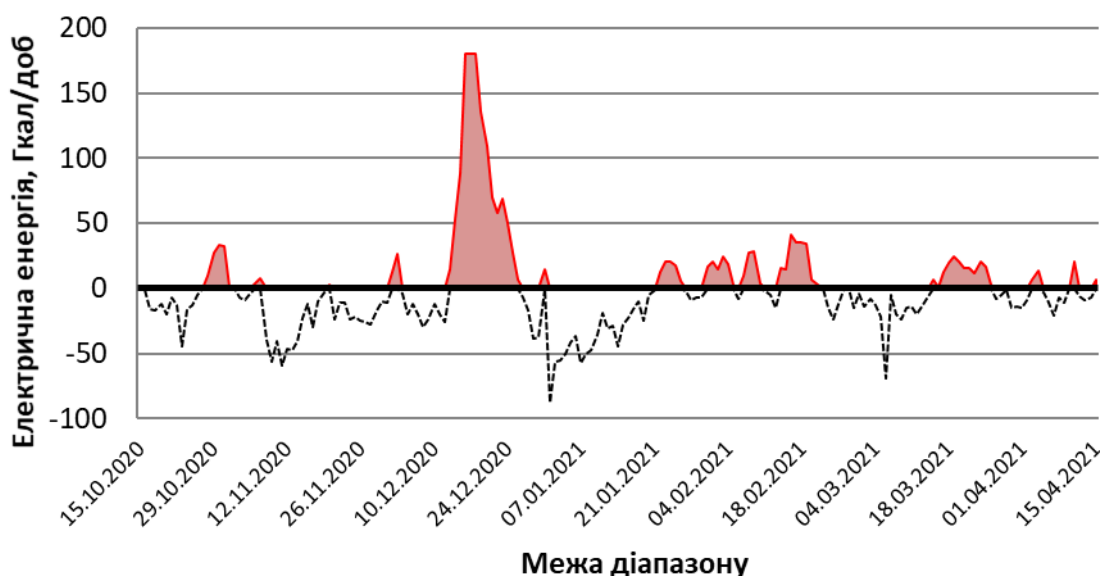


Рисунок 4.1 – Графік залишків ряду електричної енергії після відновлення без першої і другої компонент (тільки опалювальний сезон)

Для покращення якості електричної енергії розглядаємо тільки позитивні зони графіка (рис. 4.1), тобто йдеться про такі періоди, коли споживання електричної енергії переходить у режим надспоживання, що призводить до появи гармонічної складової в електричній мережі. Таким чином, додатковий

обсяг теплової енергії може бути визначений як сума додатних значень залишків ряду електроспоживання.

Загальний обсяг електричної енергії, спожитої в такому режимі, становить 2040,5 Гкал (тільки за опалювальний сезон). За вартості 1 Гкал = 1539,5 грн загальна вартість додатково відпущеної енергії споживачам становить 3 141 349,75 грн:

$$C = 2040,5 * 1539,5 = 3141,35 \text{ тис.грн.}$$

Саме стільки теплової енергії необхідно додати до основного потоку, за розрахунками, для припинення надспоживання електричної енергії і як наслідок недопущення появи гармонічної складової.

4.1.3 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект для такого підприємства доцільно визначати не як прибуток від запроваджених заходів, а як точку беззбитковості заходів [142, 143] із недопущення появи гармонічної складової електричної енергії. Його оцінювання виконується з урахуванням зменшення технічних збитків та ефективності впроваджених заходів.

Дохідна складова визначається як зменшення технічного збитку $Зт$, скориговане на коефіцієнт ефективності заходів $Км$, за вирахуванням вартості впровадження заходів $См$:

$$Д = Зт * Км - См .$$

Визначимо коефіцієнт ефективності заходів $Км$ – значення якого буде знаходитися в інтервалі між песимістичною оцінкою (коли лише частина заходів забезпечує зменшення збитків, ближче до нуля) та оптимістичною (коли більшість заходів є ефективними, ближче до одиниці), із подальшим використанням усередненого значення.

У роботі розглядався сценарій усунення гармонічної складової в електричній мережі за рахунок повної ліквідації режиму «надспоживання», якому відповідає оптимістичне значення $Км(optim) = 1$.

$$Км(optim) = Зл / Зт = 1334,4 / 1334,4 = 1,0 .$$

Однак на практиці чинники появи гармонічної складової електричної енергії є різноманітними і не обмежуються лише «надспоживанням». Може скластися ситуація коли вплив «надспоживання» на появу гармонічної складової може бути мінімальним.

Сумарний збиток якості електричної енергії Z_{Σ} , що включає $Z_{\text{відх}}$, $Z_{\text{ДВ}}$ та $Z_{\text{ТС}}$, практично не залежить від гармонічної складової. Водночас $Z_{\text{Л}} = 192,3$ тис. грн/рік – збиток, зумовлений впливом низької якості електричної енергії на покази приладів обліку, безпосередньо пов'язаний із гармонічними спотвореннями. В такому випадку розглядається коефіцієнт ефективності заходів за песимістичним сценарієм $K_{\text{м}}(\text{pess})$:

$$K_{\text{м}}(\text{pess}) = Z_{\text{Л}}/Z_{\text{Т}} = 193,3 / 1334,4 = 0,1.$$

Але в цілому дія по зменшенню надспоживання електричної енергії призведе до покращення із іншими показниками ЯЕЕ.

Визначимо коефіцієнт ефективності заходів $K_{\text{м}}$, як середнє значення між песимістичним $K_{\text{м}}(\text{pess})$ і оптимістичним значеннями $K_{\text{м}}(\text{optim})$ коефіцієнту ефективності заходів:

$$K_{\text{м}} = (K_{\text{м}}(\text{pess}) + K_{\text{м}}(\text{optim}))/2 = (0,1 + 1,0)/2 = 0,6.$$

Приймаємо $K_{\text{м}} = 0,6$. Таким чином, близько 60 % коштів, які за відсутності заходів були б спрямовані на покриття витрат, залишаються у розпорядженні підприємства.

Визначимо вартість впровадження заходів $C_{\text{м}}$, яка формується за рахунок придбання діагностичного обладнання, а також витрат на його впровадження, зокрема: створення інформаційної мережі, електричного підключення, організацію терміналів збору даних, розроблення та налагодження програмного забезпечення.

В якості приладів збору інформації по якісним показникам електричної енергії пропонується прилад PQube3 – портативний аналізатор якості електроенергії, виготовлений фірмою Power Sensors Ltd.

Вартість приладу із додатковим обладнанням (блок живлення, акумулятор, датчики струму, датчики температури, вібрацій, корпус) становить 450 тис.грн.

Облаштування приладу 25 тис.грн.

Навчання персоналу 30 тис.грн.

Облаштування місця збору даних 250 тис.грн.

Написання програмного продукту для обробки даних із відведенням їх на термінали диспетчерів 300 тис.грн.

Загальні кошти, що мають бути витрачені на облаштування системи моніторингу і програмне забезпечення, будуть становити (C_m):

$$C_m = 450 + 25 + 30 + 250 + 300 = 1055 \text{ тис.грн.}$$

Дохідною складовою при визначенні точки беззбитковості приймається зменшення розрахованого технічного збитку ($З_t$), скориговане на коефіцієнт ефективності заходів $K_m = 0,6$. Тоді:

$$Д' = З_t * K_m = 1334,4 * 0,6 = 800,7 \text{ тис.грн.}$$

Строк окупності вкладень (E) становитиме:

$$E = C_m / Д' = 1055 / 800,7 = 1,3 \text{ роки.}$$

Таким чином, використання запропонованого технічного рішення забезпечує позитивний ефект, що полягає у поліпшенні режимів роботи електричної мережі, зменшенні похибок приладів обліку електричної енергії, зменшення рівня гармонічних збурень в електричній мережі

Рекомендації по зменшенню похибки приладів обліку електричної енергії в мережі із наявністю гармонічних збурень.

Рекомендації по зменшенню впливу гармонічних збурень представлені у наступних видах:

Перши варіант – визначення величин гармонічних збурень в електричній мережі підприємства, аналіз силової схеми. Після цього підбір засобів протидії гармонічним збуренням. Це як правило підбір фільтрів пасивних і/або активних.

Щодо порядку дій по вибору фільтрів зниження гармонічних збурень в мережі, це питання розглядалося в розділі 3 п 3.1. В літературі порядок вибору фільтрів для пригнічення гармонічних збурень висвітлено достатньо добре для можливості обрати відповідний фільтр під певні режими роботи електричної мережі і певне обладнання.

Другий варіант – боротьба із причинами появи гармонічних збурень в електричній мережі підприємства. Такий підхід потребує більш глибокого аналізу. Для цього необхідно проведення аналізу силової схеми і аналізу найбільш вразливого електричного обладнання. Після чого обираються засоби або заходи щодо недопущення причин появи гармонічних збурень.

В роботі розглядався варіант зменшення гармонічної складової за рахунок створення умов припинення надспоживання електричної енергії. Саме надспоживання електричної енергії було визначено як джерело гармонічних збурень в мережі. Було обрано засоби впливу на таке джерело. В роботі запропоновано алгоритм по виявленню гармонічних збурень побудований на визначенні структурних змін часових рядів за допомогою сингулярно-спектрального аналізу. Використання такого алгоритму дозволило визначити початок, тривалість та глибину режиму надспоживання електричної енергії, що є причиною виникнення гармонічних збурень при аналізі даних потоків теплової та електричної енергій. Працездатність алгоритму була перевірена на фактичних даних теплової і електричної енергій споживання крупним районом міста, що детально представлено в роботі в Розділі 3 підрозділ 3.6 .

Для практичного застосування запропонованого алгоритму запропоновано спосіб який дозволяє сформулювати команди точного відпуску теплової енергії теплопостачаючим підприємством з метою недопущення режиму надспоживання електричної енергії тим самим прибираючи основний чинник гармонічних збурень.

Для реалізації способу по зменшенню гармонічних збурень із використанням розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень в

електричній мережі запропоновано систему моніторингу, яка має збирати поточкові дані одночасно і теплової і електричної енергії у відповідному форматі.

Саме поточкові дані обробляються алгоритмом визначення гармонічних збурень в електричній мережі. Алгоритм має детальне описання для створення програмного забезпечення.

Спосіб включає перелік технічних засобів по виявленню гармонічних збурень в електричній мережі, обробки поточкових даних і відправки їх для обробки алгоритмом. Контроль наявності гармонічних збурень пропонується проводити портативним аналізатором якості електроенергії PQube3. Склад технічних засобів по запропонованому способу зменшення гармонічних збурень дозволяє розраховувати економічні показники впровадження способу. Що дозволяє обирати технічні рішення не тільки за технічними критеріями але й економічними.

Висновки по розділу 4

У розділі виконано економічне обґрунтування запропонованого способу зменшення гармонічної складової в електричній мережі шляхом зменшення режимів надспоживання електроенергії. На основі чинних методик проведено оцінювання економічних збитків, зумовлених впливом гармонічних складових та інших відхилень показників якості електричної енергії на роботу обладнання підприємства тепlopостачання.

Встановлено, що сумарний технічний збиток від зниження якості електричної енергії для досліджуваного об'єкта становить 1334,4 тис. грн/рік, у тому числі збиток від додаткових втрат активної потужності – 234,9 тис. грн/рік, від скорочення терміну служби електрообладнання – 804,4 тис. грн/рік, від погіршення роботи освітлювальних установок – 101,8 тис. грн/рік, а від похибок приладів обліку – 193,3 тис. грн/рік.

За результатами аналізу визначено необхідний додатковий обсяг теплової енергії для усунення режимів надспоживання електричної енергії, який

становить 2040,5 Гкал за опалювальний сезон, а вартість його забезпечення – 3141,35 тис. грн.

Проведене оцінювання економічної ефективності показало, що впровадження системи моніторингу та відповідних заходів із зменшення гармонічної складової потребує капітальних витрат у розмірі 1055 тис. грн. За прийнятого коефіцієнта ефективності заходів $K_m = 0,6$ очікуване річне скорочення збитків становить 800,7 тис. грн, а розрахунковий строк окупності впровадження запропонованого рішення дорівнює 1,3 року.

Отримані результати підтверджують економічну доцільність використання запропонованого способу зменшення гармонічних складових в електричній мережі на основі використання алгоритму визначення гармонічних збурень, що дозволяє отримати зменшення збитків від гармонічних збурень в електричній мережі, підвищити надійність роботи електрообладнання та створити умови для більш ефективного функціонування систем теплопостачання й електропостачання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена науково-технічна задача із актуальної науково-технічної задачі розробки методів та засобів зменшення похибки обліку електричної енергії, спричиненої впливом гармонічних складових, що вирішується шляхом зменшення рівня гармонічних складових у мережі за рахунок створення умов для недопущення режимів понаднормативного споживання електричної енергії завдяки оптимізації теплопостачання.

Основні теоретичні та експериментальні дослідження, які виконані в дисертаційній роботі, можуть бути узагальнені такими висновками:

1 В рамках дослідження було описано основні причини виникнення гармонічних збуджень в електричній мережі теплопостачаючого підприємства, **що дозволило** провести класифікацію причин і визначити найнебезпечніші чинники гармонічних збурень, а також обрати дієві способи боротьби із появою гармонічних збурень;

2 Проаналізовано існуючі прилади обліку електричної енергії і їх будову, **що дозволило** визначити елементи, які мають найбільшу уразливість від гармонічних збурень і впливають на показання приладів обліку;

3 Вперше розроблено стенд для перевірки роботи приладів обліку електричної енергії за наявності сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень на біля межових значень, **що дозволило** провести заміри залежності відхилень показників приладів обліку від величини сумарного коефіцієнту гармонічних спотворень напруги і струму;

4 Вперше розроблено алгоритм визначення гармонічних збурень в електричній мережі із використанням математичного методу спектрально-сингулярного аналізу даних теплової і електричної енергій, **що дозволило** визначити початок, тривалість та глибину режиму надспоживання електричної енергії, що є причиною виникнення гармонічних збурень;

5 Вперше розроблено спосіб по зменшенню гармонічних збурень із використанням розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень в електричній мережі **що дозволило** сформувати команди точного відпуску теплової енергії теплопостачаючим підприємством з метою недопущення режиму надспоживання електричної енергії тим самим прибираючи основний чинник гармонічних збурень і зменшуючи похибки приладів обліку електричної енергії;

6 Проведено перевірку працездатності розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень на даних електроспоживання і теплопостачання одного району міста **що дозволило** отримати підтвердження працездатності розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень;

7 Запропоновано склад технічних засобів по впровадженню способу застосування розробленого алгоритму визначення гармонічних збурень, **що дозволило** виконати економічну оцінку впровадження способу, яка показала короткостроковий термін окупності способу;

8 Висновки та рекомендації по результатам дослідження які наведено в дисертаційній роботі можуть бути використані при розробці та модернізації електроенергетичної системи підприємств теплопостачання.

Одержані наукові результати, а саме: алгоритм визначення гармонічних збурень в електричній мережі підприємства впроваджений в КП „Харківські теплові мережі”, що підтверджено актами про впровадження від 12.09.2025 р., акт про впровадження від 02.06.2025 р., акт про впровадження від 20.06.2025 р. Результати теоретичного дослідження підтверджуються отриманими результатами експериментального дослідження в межах допустимої розбіжності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Сокол Е. И. Качество электрической энергии Том 2 Контроль качества электрической энергии / Сокол Е. И., Гриб О.Г., Жаркин А. Ф., Васильченко В. И., Тесик Ю.Ф., Ущаповский К. В., Светелик А.Д., Гапон Д. А., Громадский Ю.С., Иерусалимова Т.С. др. - ПП «Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-244 с.
- 2 Сендерович Г.А. Качество электрической энергии Том 4 Определение долевого участия потребителей и поставщиков в ответственности за нарушение качества электрической энергии / Сендерович Г.А., Гриб О.Г., Щербакова П.Г., Васильченко В. И., Ущаповский К. В., Светелик А.Д.. - ПП «Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-360 с.
- 3 Сокол Е. И. Качество электрической энергии Том 3 Методы и средства повышения качества электрической энергии / Сокол Е. И., Жаркин А. Ф., Васильченко В. И., Тесик Ю.Ф., Ущаповский К. В., Светелик А.Д., Гапон Д. А., Громадский Ю.С., Новский В.А., Михайлов В.П., Иерусалимова Т.С., Олефир Д.А., Шевченко С.Ю. - ПП «Граф-Ікс». Харьков: 2014г.-292с.
- 4 Гриб О.Г. Алгоритм реализации методики распределения ответственности за искажение синусоидальности / О.Г. Гриб, Г.А. Сендерович, П.Г. Сендерович // Коммунальное хозяйство городов: сб. научн. трудов. Вып. 67. – К.: Техника, 2005. – С. 237–246.
- 5 Жежеленко И. В. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях [Текст] / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 252 с., 74 ил.
- 6 Закон Украины об электроэнергетике: от 16.10.1997 г. № 575 // Ведомости Верховной Рады Украины. – 1998. – № 1

7 ДСТУ EN 50160:2023 (EN 50160:2022, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2023

8 Про затвердження Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів НАКАЗ МІНІСТЕРСТВО ПАЛИВА ТА ЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ № 258 від 25.07.2006

9 Проблеми вищих гармонік у мережах електроживлення Електронний ресурс. Режим доступу:

<https://energyall.com.ua/problemu-vusshuh-garmonik-v-setyah/> .

10 Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 5 – изд. М.: Энергоатомиздат, 2004.

11 Turkey B. Harmonic measurements and power factor correction in a cement factory [Electronic resource]. – Available at http://http://www.emo.org.tr/ekler/e24e1cb89212805_ek.pdf, accessed 11.03.2015.

12 Якість електричної енергії як функція зв'язаного енергоспоживання міських енергомереж/ О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, С. В. Швець, О. В. Лука, Є. О. Кауркін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Hydraulic machines and hydraulic units: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Х.: НТУ «ХПІ», 2022. – № 2. – С. 60–65.

13 Kusko A. Power quality in electrical systems [Text] / A. Kusko, M. T. Thompson. – [S. l.] : McGraw-Hill Companies. – 2007. – 225 p.

14 Рой В. Ф. Конспект лекцій із дисципліни «Електромагнітна сумісність у системах електроспоживання» (для студентів 5 курсу денної та 6 курсу заочної форм навчання магістерської програми за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / В. Ф. Рой ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. – 114 с.

15 ДСТУ 3466-96 Якість електричної енергії. Терміни та визначення

16 Теорія адаптивної компенсації реактивної потужності електричного рухомого складу залізниць: монографія / С. Гулак, В. Ткаченко. – Вінниця: ГО «Європейська наукова платформа», 2022. – 174 с

17 Electrical Power Systems Quality [Text] / R. C. Dugan [et al.]. – 2nd ed. – [S. l.] : McGraw-Hill Companies, 2004. – 522 p.

18 Arrillaga J. Power systems harmonics [Text] / J. Arrillaga, N. R. Watson. – 2nd ed. – Chichester : John Wiley & Sons, 2003. – 412 p.

19 BS EN 50160:2010. Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks [Electronic resource]. – Available at : <http://www.standards.ru/document/4579232.aspx>, accessed 25.06.2014.

20 Качество электрической энергии в системах электроснабжения / Баталов А.Г., Гриб О.Г., Сендерович Г.А., и др. – Харьков: ХНАГХ, 2006. – 272 с.

21 П.П. Рожков, С.Е. Рожкова. Конспект лекцій з дисципліни “Надійність електричних мереж”. - Харків: ХНАМГ, 2008. – 89 с.

22 Правила улаштування електроустановок / Міненерговугілля України. – Київ : 2017. – 617 с

23 Wagner V. E. Effects of harmonics on Equipment [Text] / V. E. Wagner [et al.] // IEEE Transactions on Power Delivery. – 1993. – Vol. 2, № 8. – P. 672–680.

24 Шклярский Я. Э. Методы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования [Текст] / Я. Э. Шклярский, А. Н. Скамьин // Электрика. – 2011. – № 12. – С. 39–41.

25 Висящев А. Н. О влиянии высших гармоник на работу устройств релейной защиты и автоматики, включенных через емкостные делители напряжения [Текст] / А. Н. Висящев [и др.] // Электрические станции. – 1978. – № 8. – С. 52–55.

26 Mariscotti, A.; Sandrolini, L. Detection of Harmonic Overvoltage and Resonance in AC Railways Using Measured Pantograph Electrical Quantities. *Energies* 2021, 14(18), 5645; <https://doi.org/10.3390/en14185645> .

27 Henderson R. D. Harmonics : The effects on power quality and transformers [Text] / R. D. Henderson, P. J. Rose // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1994. – Vol. 30, № 3. – P. 528–532.

28 Жежеленко И. В. Электрические потери от высших гармоник в системах электроснабжения [Текст] / И. В. Жежеленко // Электрика. – 2010. – № 4. – С. 3–6.

29 Технологічні витрати електроенергії в розподільних мережах 10-0,38 кВ : навчальний посібник / В. В. Кулик, А. В. Писклярова, Д. С. Пискляров. – Вінниця : ВНТУ, 2011. - 180 с.

30 Основы энергоефективности электрических систем с тяговыми навантаженнями : монографія [Текст] / І. В. Доманський. - Х. : ТОВ «Центр ін формації транспорту України», 2016. - 224 с.

31 Пересада, С.М., В.М. Михальський, Ю.М. Зайченко, і С.М. Ковбаса. 2018. «СЕЛЕКТИВНЕ ТА АДАПТИВНЕ ОЦІНЮВАННЯ ГАРМОНІК ДЛЯ ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФІЛЬТРА». ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА, вип. 2 (Березень):029. <https://doi.org/10.15407/techned2018.02.029>. .

32 Баталов А.Г. Гриб О.Г. Сендерович Г.А. и др. Качество электрической энергии в системах электроснабжения. – Под редакцией О.Г. Гриба.-Харьков: ХНАГХ, 2006.- 272 с.

33 Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / Под ред.И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 296 с.

34 Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Качество электроэнергии на промышленных предприятиях. – 4-е изд., перераб. и доп.-М.: Энергоатомиздат, 2005. - 261 с.

35 Шидловский А.К. Электрические цепи с вентильными коммутаторами / Шидловский А.К., Федий В.С. – Киев: ООО «Артпринт», 2010. – 270 с.

36 Розанов Ю. К. Силовая электроника и качество электроэнергии / Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А., Гринберг Р.П. // Технічна електродинаміка. Темат. вип. "Силова електроніка та енергоефективність". – 2001. – Ч. 3 – С. 3–6

37 Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. – К.: Наук. думка, 2005. – 210 с.

38 Експериментальне порівняння методів вимірювання рівня гармонічних складових сигналу напруги промислової мережі Красноградського району/ Харківської області Гриб О.Г., Гапон Д.А., Жданов Р.В.//Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 153 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Харків: ХНТУСГ, 2014. – С.90-92

39 Работа средств защиты от перенапряжений в энергосистемах при наличии высших гармоник/ Гриб О.Г., Гапон Д.А., Жданов Р.В., Иерусалимова Т.С.// Вісник Національного технічного університету «Харківський Політехнічний інститут». – Харків: НТУ «ХПІ». – 2014. - №41(1084) – С.78-86

40 Проблеми якості електричної енергії живлячої мережі при підключенні пристрою з активним перетворювачем / Гриб О.Г., Гапон Д.А., Зуєв А.О., Жданов Р.В. – Вінниця: ВНТУ, Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології, №2, 2013. С. 87

41 БЄЛОХА, Г & МУЗИКА, В. (2025). АНАЛІЗ ПРОБЛЕМ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ В СУЧАСНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ. Вісник Херсонського національного технічного університету. 1. 40-48. 10.35546/kntu2078-4481.2025.3.1.5. .

42 De La Rosa, Francisco. “Harmonics and Power Systems.” Electric Power Engineering Series, 2006. doi:10.1201/9781420004519.

43 Контроль потребления электроэнергии с учетом ее качества / О.Г. Гриб, В.И. Васильченко, Г.А. Сендерович, П.Г. Щербакова и др.; под ред. О.Г. Гриба. –Харьков: ХНУРЭ, 2010. – 444с.

44 ДСТУ ІЕС 62053-21:2012 Засоби вимірювання електричної енергії змінного струму

45 Тесик, Ю., Карасінський, О., Мороз, Р., Пронзалева, С. і Зайков, М. 2023. АНАЛІЗ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ РОБОТИ МЕРЕЖІ НА РІВЕНЬ ОБЛІКУ АКТИВНОЇ ТА РЕАКТИВНОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ . ТЕХНІЧНА ЕЛЕКТРОДИНАМІКА. 2 (Лют 2023), 069. DOI:<https://doi.org/10.15407/techned2023.02.069>.

46 Plakhtiy, A. (2018). Аналіз впливу вищих гармонік на втрати потужності в системах електропостачання. Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях, 1(26(1302)), 126–134. <https://doi.org/10.20998/2413-4295.2018.26.18>

47 Induction Type Energy Meter - Construction, Working & Torque Equation / електронне джерело. посилання <https://www.electricaldesks.com/2023/01/induction-type-energy-meter-construction-working.html> .

48 Принцип роботи індукційного лічильника Електроний ресурс. режим доступу: Посилання: https://ecshop.com.ua/ua/articles/6.kakie_bivayut_schetchiki_elektroenergiy .

49 Що ви хотіли знати про електролічильника. Електроний ресурс. Режим доступу: <https://elmisto.com.ua/ua/a157064-chto-hoteli-znat.html> .

50 Конспект лекцій з дисципліни дисципліни “Системи вимірювання, обліку та керування енерговикористанням” для студентів спеціальності 141- “Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка” /Укладач к.т.н., доц. Волянський Р.С. Дніпродзержинськ, ДДТУ,2016.- 120 с.

51 Структурний опис і принцип дії електронних лічильників електроенергії Режим доступу: <https://elmisto.com.ua/ua/a193545-strukturnoe-opisanie-printsip.html> .

52 Трансформатор напруги Електроний ресурс. Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D1%80%D0%B0%D0%BD%D1%81%D1%84%D0%BE%D1%80%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%80_%D0%BD%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%83%D0%B3%D0%B8 .

53 Li, X., Zhang, Y. Research status of optical fiber voltage transformer (OVT) [electronic resource] / X. Li, Y. Zhang // Journal of Optoelectronics and Laser. – 2022. – Vol. 33, no. 4. – P. 456–463. – DOI: 10.1007/s12xxx-2022-1234-y.

54 Yue, H., Yu, J., Jian, Z. Design and experimental research on a novel optical voltage transformer [electronic resource] / H. Yue, J. Yu, Z. Jian // International Journal of Electrical Power & Energy Systems. – 2021. – Vol. 128. – Article ID 106723. – P. 1–10. – DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106723.

55 Zhao, K., Wang, L., Liu, Y. Optical sensors for power transformer monitoring [electronic resource] / K. Zhao, L. Wang, Y. Liu // High Voltage. – 2021. – Vol. 6, no. 2. – P. 198–210. – DOI: 10.1049/hve2.12021.

56 ДСТУ ІЕС 60051-1:2004 Прилади електровимірювальні аналогові показувальні прямої дії та допоміжні частини до них. Частина 1. Визначення та основні вимоги, загальні для всіх частин (ІЕС 60051-1:1997, IDT)

57 Шевцов Ю. П., Білецький В. І. Загальні відомості та призначення трансформатора струму [електронний ресурс] / Ю. П. Шевцов, В. І. Білецький // Навчальний матеріал з електрообладнання. – НБУ, 2022. – Розділ: «Трансформатори струму». – Режим доступу:

https://elearn.nubip.edu.ua/pluginfile.php/684982/mod_book/chapter/118253/Лекція%207%20Трансформатори%20струму%20current%20transformers.pdf

58 Зелінський В. Ц. Фізичні основи електричних апаратів: навчальний посібник / Зелінський В. Ц. – Вінниця : ВДТУ, 2001. – 134 с.

59 Аналіз типових несправностей трансформатора Режим доступу: <http://ua.scotech-electrical.com/info/analysis-of-common-transformer-faults-75784856.html> .

60 Zhang, Y., Sun, X. Optical current transformer based on Faraday effect in fiber coils [electronic resource] / Y. Zhang, X. Sun // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2020. – Vol. 69, no. 5. – P. 1230–1238. – DOI: 10.1109/TIM.2019.2947890.

61 Zhang, Y. ; Wang, H. ; Li, J. Recent Progress of All Fiber Optic Current Transformers // IEEE 16th International Conference on Advanced Infocomm Technology (ICAIT). – 2024. – DOI: 10.1109/ICAIT62580.2024.10808077

62 Gu, Songlin ; Feng, Teng. Development of optical instrument transformers // Global Energy Interconnection. – 2019. – Vol. 2, Iss. 6. – C. 531–540.

63 Tian, Zhiguo ; Chen, Mingming ; Zhang, Xule ; Zhao, Shuangshuang. The Key Technology Research on Standard Current Transformer of Rogowski Coil // Proceedings of the 2016 International Conference on Artificial Intelligence and Engineering Applications. – Atlantis Press, 2016. – C. 530–542. – DOI: 10.2991/aiea-16.2016.95.

64 Koshkin, A., Sokolov, V. Fiber-optic current transformers for switchgear and substations [electronic resource] // International Journal of Power and Energy Systems. – 2021. – Vol. 41, no. 3. – P. 112–120. – DOI: 10.2316/J.2021.41.3.112.

65 Gao, W., Li, H. Digital optical current transformer (DOCT) for smart grid applications [electronic resource] / W. Gao, H. Li // Electric Power Systems Research. – 2018. – Vol. 161. – P. 19–27. – DOI: 10.1016/j.epsr.2018.04.009.

66 Faraday Rotation Електроний ресурс. Режим доступу: <https://physicsopenlab.org/2019/08/20/faraday-rotation/> .

67 KP1095ПП1 Електроний ресурс. Режим доступу: https://www.radoradar.net/hand_book/hand_books/kp1095pp1.html .

68 AD7755 Електроний ресурс. Режим доступу: <https://www.analog.com/en/products/ad7755.html> .

69 Принцип роботи електронного лічильника Електроний ресурс Режим доступу: https://uk.shram.kiev.ua/megafaza/electro_sh.shtml .

70 Измеритель активной мощности , многоканальный счетчик - ваттметр МК АТmega8. Электронный ресурс Режим доступа: <https://sxem.org/m/2-vse-stati/24-izmereniya/44-izmeritel-aktivnoj-moshchnosti-mnogokanalnyj-schetchik-vattmetr-mk-atmega8> .

71 Якість електричної енергії. Електронний ресурс. Режим доступу <https://www.nerc.gov.ua/sferi-diyalnosti/elektroenergiya/yakist-elektropostachannya/yakist-elektrichnoyi-energiyi> .

72 Волошко А. В., Филянин Д. В., Влияние качества электроэнергии на точность показаний электросчетчиков: обзор исследований / Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2014 (87), С. 38-43

73 Електронний підручник «Енергетична електроніка» / ЖуйковВ.Я., РогальВ.В., БудьонийО.В., ПілінськийВ.В., ШвайченкоВ.Б. таінш.

74 Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения пром предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 266 с.

75 Кузнецов В.Г. Универсальный метод анализа частотных свойств многофазных цепей // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Моделювання електронних, електричних та технологічних систем». – 1999. – 4.1. – С. 7–10.

76 Домнин И.Ф., Жемеров Г.Г., Копачовец О.И. Характеристики полупроводникового фильтрокомпенсирующего устройства в установившемся режиме//Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Силовая електроніка та енерго ефективність». – 2003. – 4.4. – С. 15–20.

77 Жежеленко И. В., Саенко Ю Л. Проблемы качества электроэнергии // Промислова електроенергетика та електротехніка. – 2002. – № 4. – С. 13– 26.

78 Freund A. Nonlinear loads mean trouble // Electr.Constr. and Maint. – 1988. - Vol.87, N 3. – P. 83–90.

79 Grabe T.E. Solving harmonic problems in industrial plants and harmonic mitigation techniques for adjustable speed drives / Proc. of Elertrotech 92, Montreal, 1992.

80 Жук А.К. Управление силовыми активными фильтрами с применением датчиков тока // Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2003. – 4.4. – С. 79–84.

81 Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Гринберг Р.П., Смирнов М.И. Гибридный фильтр высших гармоник//Техн. електродинаміка: Тем. вип. «Силовая електроніка та енергоефективність». – 2003. – Ч.3. – С. 31–32.

82 Quality of Power and Standardization // Proceedings of the International Conference, Tallinn, Estonia. – 1996. – 244 p.

83 Вороновский Г.К. Усовершенствование практики оперативного управления крупными теплофикационными системами в новых экономических условиях. - Х.: Изд-во "Харьков", 2002. – 240 с.

84 Polyvianchuk, A., Semenenko, R., Kapustenko, P., Klemeš, J. J., & Arsenyeva, O. (2023). The efficiency of innovative technologies for transition to 4th generation of district heating systems in Ukraine. Energy, 263, 125876.

85 Arabkoohsar, A. (2019). Non-uniform temperature district heating system with decentralized heat pumps and standalone storage tanks. Energy, 170, 931-941.

<https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.12.209> .

86 ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування [чинний від 01.01.2014 (Національні стандарти України) К. : Держстандарт України, 2013. – 135 с.

87 ДБН В.2.5-39:2008 Теплові мережі [чинний від 07.01.2009] (Національні стандарти України) К. : Держстандарт України, 2008. – 72 с.

88 Постанова кабінету міністрів України [від 21 серпня 2019 р. № 830 «Про затвердження Правил надання послуги з постачання теплової енергії і типових договорів про надання послуги з постачання теплової енергії»

89 Політика енергоефективності та енергозбереження як чинник національної консолідації: проблеми формування та реалізації: монографія / Перегуда Є. В., Стойко О. М., Деревінський В. Ф., Семко В. Л., Мамонтов І. О., Місержи С. Д. - Київ-Тернопіль. «Економічна думка», 2018. 202 с.

90 Теплові мережі : навчальний посібник / Н. Д. Степанова, Д. В. Степанов. – Вінниця : ВНТУ, 2009. – 135 с.

91 von Rhein J., Henze G. P., Long N., Fu Y. Development of a topology analysis tool for fifth-generation district heating and cooling networks. *Energy Conversion and Management*. 2019. Vol. 196. P. 705–716. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.066> .

92 Arsenyeva, Olga & Бабаєв, В.М & Білецький, І.В & Blinov, Ihor & Viktoriia, Hrankina & Sergiy, Plankovskyy & Pliuhin, Vladyslav & Romanova, Tatiana & Starostina, Alona & Сухонос, М.К & Teliura, Nataliya & Tsegelnyk, Yevgen. (2023). СИСТЕМИ ЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ. *Municipal economy of cities*. 10.33042/978-966-695-594-7.

93 Сергеев С.А., Гринченко А.А. Экспертная система для идентификации качества теплоснабжения бытовых потребителей. // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Збірник наукових праць. Тематичний випуск: Електроенергетика і перетворююча техніка. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2005. - №36., С. 111-118.

94 Andarini R. The role of building thermal simulation for energyefficient building design // *Energy procedia*. – 2014. – V. 47. – P. 217–226

95 Анализ и оценка экономических ущербов от низкого качества электрической энергии: Монография / [Онищенко В.А, Самойленко И.А., Гриб О.Г., Жаркин А.Ф., Васильченко В.И., Ущаповский К.В., Сендерович Г.А., Светелик А.Д., Кондратенко К.И., Довгальок О.Н., Щербакова П.Г., Захаренко Н.С.] / Под ред. В.А. Онищенко. – Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2013. – 329 с.

96 "Велике випробування": експертка розповіла про наслідки відключень електрики для бізнесу [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://suspilne.media/334816-velike-viprobuvanna-ekspertka-rozpovila-pro-naslidki-vidklucen-elektriki-dla-biznesu/> (дата звернення 21.01.2025)

97 Martin E., Morris J., Lane S. Monitoring process manufacturing performance // IEEE Control Systems Magazine. - 2002. - Vol.22, №5. - P. 26-39.

98 Rao Ch.V., Rawlings J.B. Constained Process Monitoring: Moving-Horizon Approach // AIChE Journal. - 2002. - Vol. 48, №1. - P. 97-109.

99 Kano M., Nagao K., Hasebe Sh., Hashimoto I., Ohno H., Strauss R., Bakshi B. Comparison of statistical process monitoring methods: application to the Eastman challenge problem // Computers and Chemical Engineering. - 2000. -Vol. 24. - P. 175-181.

<http://www.che.eng.ohio-state.edu/bakshi/kanoCACE.pdf> .

100 Ruusunen M., Paavola M. Quality Monitoring and Fault Detection in an Automated Manufacturing System - a Soft Computing Approach: Report A No 19 / Control Engineering Laboratory, Department of Process and Environmental Engineering, University of Oulu, Finland. - 2002. - 38 p.

<http://herkules.oulu.fi/isbn9514275128/isbn9514275128.pdf> .

101 Chen Kuang-Han, Boning D.S, Welsch R.E. Multivariate Statistical Process Control and Signature Analysis Using Eigenfactor Detection Methods / Massachusetts Institute of Technology, Cambridge. - 2001. - 21 p.

<http://www.galaxy.gmu.edu/interface/I01/I2001Proceedings/K-HChen/K-HChen.pdf>.

102 Yoon S., Kettaneh N., Wold S., Landry J., Pepe W. Multivariate Process Monitoring and Early Fault Detection (MSPC) using PCA and PLS // Plant Automation and Decision Support Conference CC-03-157. - San Antonio (Texas). - 2003. - 20 p.

<http://www.umetrics.com/pdfs/events/MSPC20Application20at20Honeywell2028NPRA29.pdf> .

103 Xue X., Tang J., Sammes N., Ding Y. Model-based condition monitoring of PEM fuel cell using Hotelling T2 control limit // Journal of Power Sources. - 2006. - Vol. 162. - P. 388–399.

<http://ie.tamu.edu/People/faculty/Ding/PEM.Monitoring.JPS.2006.pdf> .

104 Vermasvuori M., Vatanski N., Jämsä-Jounela S-L. Data-Based Fault Detection of the Online Analysers in a Dearomatisation Process: Report / Helsinki University of Technology Laboratory of Process Control and Automation, Networked Control Systems Tolerant to Faults (NeCST) project IST-004303.-Helsinki, 2006. – 6 p.

http://www.strep-necst.org/1st_workshop/Vermasvuori.pdf .

105 William W.S. Wei-Time Series Analysis - Univariate and Multivariate Methods (2nd Edition) - Addison Wesley (2005)

106 Brillinger, D.R. Time Series: Data Analysis and Theory, 1981

<https://books.google.com.ua/books?id=iOdQAAAAMAAJ>

107 Maggino, F., Fattore, M. (2014). Multivariate Statistical Analysis. In: Michalos, A.C. (eds) Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research. Springer, Dordrecht.

https://doi.org/10.1007/978-94-007-0753-5_1890 .

108 Kendall, M. and Stuart, A. (1979) The Advanced Theory of Statistics: Inference and Relationship. Hodder Arnold, London.

109 Otnes, Robert K and Enochson, Loren D. Applied time series analysis / Robert K. Otnes, Loren Enochson Wiley New York 1978

110 Никифоров И.В. Последовательное обнаружение изменения свойств временных рядов. М.: Наука, 1983, - 199 с.

111 Ширяев А.Н. Статистический последовательный анализ. Оптимальные правила остановки. Изд. 2-е перераб. М.: Наука, 1976, - 272 с.

112 Wang Y, Zhang X, Zhao K, Singh D. Streamflow in the United States: Characteristics, trends, regime shifts, and extremes. Sci Data. 2024;11(1):788. Published 2024 Jul 17. doi:10.1038/s41597-024-03618-0

113 Adams R.P., MacKay D.J.G. Bayesian Online Changepoint Detection. 2007.

114 Baldi A., et al. An Evaluation of Change Point Detection Algorithms. arXiv:2003.06222. 2020.

- 115 Qi, Q., Wang, Z., Zhang, Z. et al. Construction and application of copula-based trivariate standardized river disconnection index for seasonal rivers in arid and semi-arid areas. *Sci Rep* 15, 26621 (2025).
- 116 <https://doi.org/10.1038/s41598-025-11513-w>
- 117 Аналіз даних та статистична обробка сигналів: навч. посіб. /О.Є. Архіпов, С.А. Архіпова . – 2012 р.
- 118 Lavielle, M., Teyssière, G. Detection of multiple change-points in multivariate time series. *Lith Math J* 46, 287–306 (2006).
<https://doi.org/10.1007/s10986-006-0028-9> .
- 119 Izadi-Zamanabadi R. Lecture Notes - Practical Approach to Reliability, Safety, and Active Fault-tolerance.- Aalborg: Aalborg University Department of Control Engineering, Fredrik Bajers Vej 7C, 2000. - 40 p.
<http://www.control.auc.dk/~riz/reliability.ps> .
- 120 Gelle G., Colas M., Servi re C. BSS for Fault Detection and Machine Monitoring Time or Frequency Domain Approach?
<http://www.cis.hut.fi/ica2000/proceedings/0555.pdf> .
- 121 Mina J., Verde C. Fault Detection for Large Scale Systems Using Dynamic Principal Components Analysis with AdaptationInternational // *Journal of Computers, Communications & Control*. - 2007. - Vol. II, №2. - P. 185-194.
<http://www.journal.univagora.ro/download/pdf/84.pdf>
- 122 Nigitz, Thomas & G lles, Markus, 2019. "A generally applicable, simple and adaptive forecasting method for the short-term heat load of consumers," *Applied Energy*, Elsevier, vol. 241(C), pages 73-81.
- 123 Kourti T. Process analysis and abnormal situation detection: from theory to practice // *IEEE Control Systems Magazine*. - 2002. - Vol.22, №5. - P. 10-25.
- 124 Димова Г.О. Методи і моделі упорядкування експериментальної інформації для ідентифікації і прогнозування стану безперервних процесів: монографія. / Ганна Олегівна Димова. Херсон: Видавництво ФОП Вишемирський В.С., 2020. 176 с.

125 Munther, Salih. (2010). Factor analysis (statistical technique). 10.13140/RG.2.2.26463.57760.

126 Kim, J. O., & Mueller, C. W. (1978). Factor analysis: Statistical methods and practical issues. (Sage University Paper Series on Quantitative Applications in the Social Sciences, series no. 07-014). Newbury Park, CA: Sage.

127 Моделювання системних характеристик в економіці / О. М. Сінчук, Т. М. Берідзе, В. В. Кононенко та ін.; за ред. Сінчук О. М. – Кременчук : ПП Щербатих О. В., 2009. – 211 с.

128 Wold, Svante & Esbensen, Kim & Geladi, Paul. (1987). Principal Component Analysis. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems. 2. 37-52. 10.1016/0169-7439(87)80084-9. .

129 Єгоршин О. О. Методи багатовимірного статистичного аналізу: навч. посібн. / О. О. Єгоршин, А. М. Зосімов, В. С. Пономаренко. – Київ : ІЗМН, 1998. – 208 с

130 Бізнес-аналітика багатовимірних процесів [Електронний ресурс] : навч. посіб. / Т. С. Клебанова, Л. С. Гур'янова, Л. О. Чаговець [та ін.] ; Харківський національний економічний університет ім. С. Кузнеця. - Електрон. текстові дан. (6,61 МБ). - Харків : ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2018. – 271 с.

131 Гирко В.Л. Многомерный статистический анализ: Учеб. Пособие. - К.: Вища школа, 1988. – 320 с.

132 Потребление электроэнергии в Украине с начала года выросло на 7%
Електронний ресурс. Режим доступу
<https://pravda.com.ua/rus/news/2021/11/04/679423/> .

133 Программный продукт Caterpillar. Интернет ресурс. Режим доступу
<http://www.gistatgroup.com> .

134 Несинусоїдальні і несиметричні режими в електроенергетичних системах / Є. І. Сокол, Г. А. Сендерович, О.Г. Гриб, Т.С. Донецька, А. О. Запорожець, В. В. Скопенко, І. Т. Карпалюк, Д. А. Гапон, О. Ю. Заковоротний,

В. Є. Кривоносов, В. П. Старенький, Н. С. Захаренко, О. В. Лука, С. С. Козлов – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 202 с.

135 Енергетичний менеджмент та енергоефективність: Підручник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка/ І. О. Самойленко, О.Г. Гриб, А. О. Запорожець, Ю. Л. Прончаков, В. В. Скопенко, І. Т. Карпалюк, Н. С. Захаренко, Н. М. Шматько – Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. – 348 с.

136 Grasso F., Luchetta A., Manetti S., та ін. Measurement of Electric Power Quantities and Efficiency in Nonsinusoidal Conditions: 2018 110th AEIT International Annual Conference, AEIT 2018, 18.

137 Сокол Е. И., Гриб О. Г., Жаркин А. Ф., та ін. Автоматизированные системы контроля и учета электрической энергии : монография: Харьков: ТОВ «Тім Пабліш Груп», 2014. 488с.

138 Bollen M. H. Understanding Power Quality Problems: Understanding Power Quality Problems. 2010

139 Chapman D. The Cost of Poor Power Quality. Power Quality Application Guide,. 2003

140 Halpin S. M. Comparison of IEEE and IEC harmonic standards: 2005 IEEE Power Engineering Society General Meeting, 05

141 Оцінки економічних збитків, завданих внаслідок переривання процесу виробництва, передачі та постачання електричної енергії або відхилення показників якості від нормованих значень. Типова методика/ І. Самойленко, Д. Олефір, В. Васильченко і інші, ОЕП «ГРІФРЕ», 2015, 33с.

142 Малярець Л.М., Штереверя А.В. Збалансована система показників в оцінці діяльності підприємства. Наукове видання. – Харків: Вид. ХНЕУ, 2008. – 188 с.

143 Kristina Russo Break-Even Point: Definition, Calculation, and Uses, 2025
https://www.netsuite.com/portal/resource/articles/accounting/break-even-point-bep.shtml?utm_source=chatgpt.com

ДОДАТКИ

Додаток А Прилад обліку якості електричної енергії АНТЭС АК-3Ф



Рисунок А.1 – Зовнішній вигляд приладу «АНТЭС АК-3Ф»

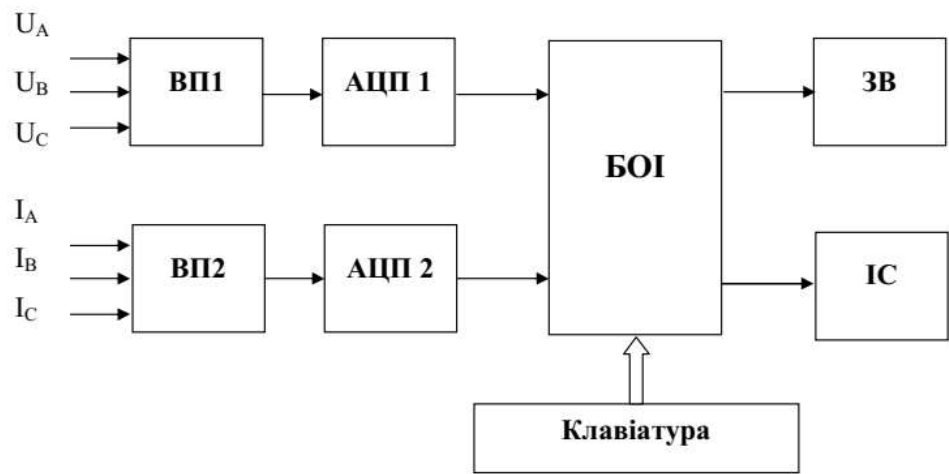


Рисунок А.2 – Структурна схема приладу «АНТЭС АК-3Ф»

Таблиця А.1 – Характеристики приладу «АНТЭС АК-3Ф»

- значення відносної похибки вимірювань по напрузі, струму і потужності не більше 0,1%, функція автокалібрування і термостатінгу
- наявність кольорового ЖК-дисплею з підсвічуванням
- наявність інтерфейсу USD (RS 485 – опція)
- електричне живлення приладу 220 В

Таблиця А.2 – Перелік параметрів вимірювання приладу «АНТЭС АК-3Ф»

№	Показник
1	Діюче значення напруги в фазах
2	Діюче значення сили змінного струму в фазах
3	Коефіцієнт спотворення синусоїдальности кривої напруги в фазах
4	Коефіцієнт спотворення синусоїдальности кривої струму в фазах
5	Коефіцієнт n-ї гармонічної складової напруги в фазах
6	Коефіцієнт n-ї гармонічної складової по струму в фазах
7	Діюче значення гармонік по напрузі в фазах
8	Кут між векторами першої та n-ї гармоніки по напрузі в фазах
9	Діюче значення гармонік по струму (в кожній фазі)
10	Кут між векторами першої та n-ї гармоніки по струму (в кожній фазі)
11	Кут між струмом і напругою (в кожній фазі)
12	Кут зсуву між фазами А, В, С по напрузі
13	Кут зсуву між фазами А, В, С по струму
14	Коефіцієнт потужності в фазах
15	Коефіцієнт потужності в трифазній мережі
16	Коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності
17	Коефіцієнт несиметрії струмів за зворотною послідовністю
18	Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю
19	Коефіцієнт несиметрії струму за нульовою послідовністю
20	Пряма послідовність напруги
21	Пряма послідовність струму
22	Зворотній послідовність напруги
23	Зворотній послідовність струму
24	Нульова послідовність напруги
25	Нульова послідовність струму
26	Стале відхилення напруги (в кожній фазі)
27	Стале відхилення напруги в трифазній мережі
28	Активна, реактивна і повна потужність (по кожній фазі)
29	Активна, реактивна і повна потужність в трифазній мережі
30	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная- потужність (в кожній фазі)
31	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная- потужність в трифазній мережі
32	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная-, повна потужність в кожній фазі по n-ї гармонічної складової для n від 1 до 40
33	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная-, повна потужність зворотній послідовності
34	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная-, повна потужність нульової послідовності
35	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная-, повна потужність прямий послідовності
36	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная-, повна потужність спотворень
37	Активна *, активная-, реактивна *, реактивная-, повна електроенергія спотворень
38	Електроенергія активна, реактивна, повна прийнята і віддана в фазах
39	Електроенергія в трифазній мережі
40	Частота
41	Відхилення частоти

Продовження таблиці табл. А.2

1	2
42	Лічильник числа виходів коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги за нормально допустимі значення в кожній фазі
43	Лічильник числа виходів коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги за гранично допустимі значення (в кожній фазі)
44	Лічильник числа виходів коефіцієнта n -ї гармонічної складової напруги для n від 2 до 40 за нормально допустимі в кожній фазі
45	Лічильник числа виходів коефіцієнта n -ї гармонічної складової напруги для n від 2 до 40 за гранично допустимі в кожній фазі
46	Лічильник числа виходів коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності за нормально допустимі значення
47	Лічильник числа виходів коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності за гранично допустимі значення
48	Лічильник числа виходів коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю за нормально допустимі значення
49	Лічильник числа виходів коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю за гранично допустимі значення
50	Лічильник числа виходів усталеного відхилення напруги за нормально допустимі значення за кожен інтервал статистики в кожній фазі
51	Лічильник числа виходів усталеного відхилення напруги за гранично допустимі значення за кожен інтервал статистики в кожній фазі
52	Лічильник числа виходів усталеного відхилення напруги за нормально допустимі значення за кожен інтервал статистики в трифазній мережі
53	Лічильник числа виходів усталеного відхилення напруги за гранично допустимі значення за кожен інтервал статистики в трифазній мережі
54	Лічильник числа виходів відхилення частоти за нормально допустимі значення за кожен інтервал статистики
55	Лічильник числа виходів відхилення частоти за гранично допустимі значення за кожен інтервал статистики
56	Лічильник числа провалів напруги тривалістю до 30 с
57	Лічильник числа провалів напруги тривалістю 30 с і більше
58	Лічильник числа тимчасових перенапруг
59	Технологічні втрати в повітряних лініях (навантажувальні втрати)
60	Технологічні втрати в повітряних лініях (втрати на коронний розряд)
61	Вольтамперфазометр трифазної мережі (контроль правильності підключення аналізаторів якості електроенергії та приладів обліків)
62	Журнал подій з фіксацією порушення нормально і гранично допустимих значень показника, величини показника і часу фіксації

Додаток Б Результати замірів показників якості електричної енергії в розподільній мережі підрозділу підприємства КП «Харківські теплові мережі»

Б.1 Підрозділ 1 підприємства КП «Харківські теплові мережі»



Рисунок Б.1 – Середня напруга в фазі А. Протокол замірів: ТП 6/0,4 кВ, з 11.08.20 14:00 по 13.08.20 14:00



Рисунок Б.2 – Середня напруга в фазі В. Протокол замірів: ТП 6/0,4 кВ, з 11.08.20 14:00 по 13.08.20 14:00



Рисунок Б.3 – Середня напруга в фазі С. Протокол замірів: ТП 6/0,4 кВ, з 11.08.20 14:00 по 13.08.20 14:00



Рисунок Б.4 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги по фазам А, В, С



Рисунок Б.5 – Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю



Рисунок Б.6 – Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю

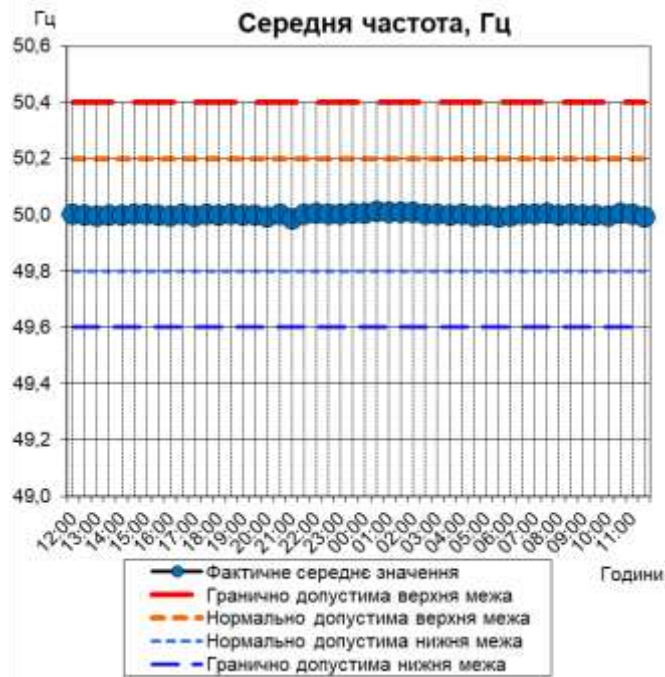


Рисунок Б.7 – Відхил частоти

Б.2 Підрозділ 2 підприємства КП «Харківські теплові мережі»



Рисунок Б.8 – Середня напруга в фазі А. Протокол замірів: ПС 10/04 з 12.08.20 14:00 по 14.08.20 14:00



Рисунок Б.9 – Середня напруга в фазі В. Протокол замірів: ПС 10/04 з 12.08.20
14:00 по 14.08.20 14:00



Рисунок Б.10 – Середня напруга в фазі С. Протокол замірів: ПС 10/04 з 12.08.20
14:00 по 14.08.20 14:00



Рисунок Б.11 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги по фазах А, В, С



Рисунок Б.12 – Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю



Рисунок Б.13 – Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю

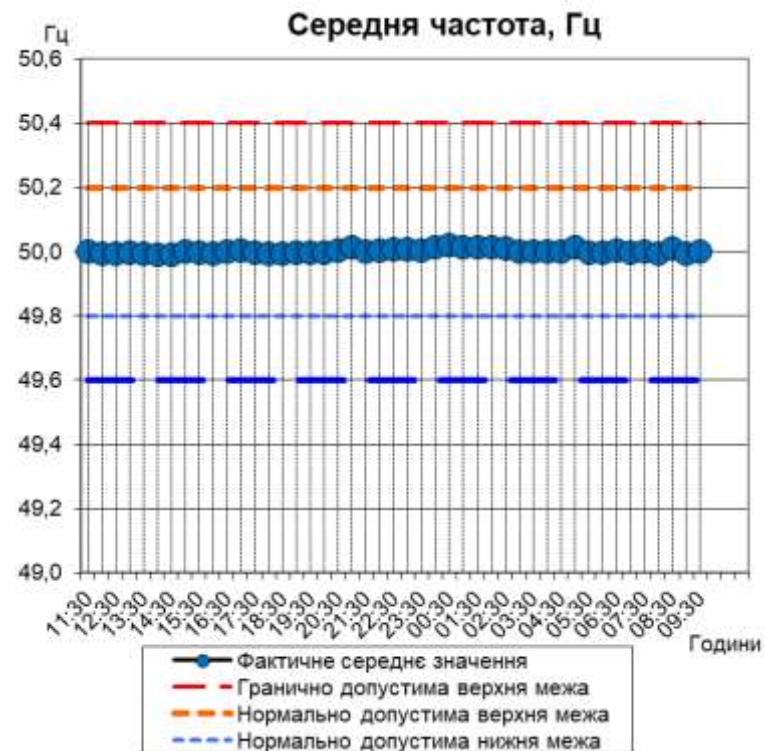


Рисунок Б.14 – Відхил частоти

Б.3 Підрозділ 3 компресорна станція підприємства КП «Харківські теплові мережі» ПС 110/10

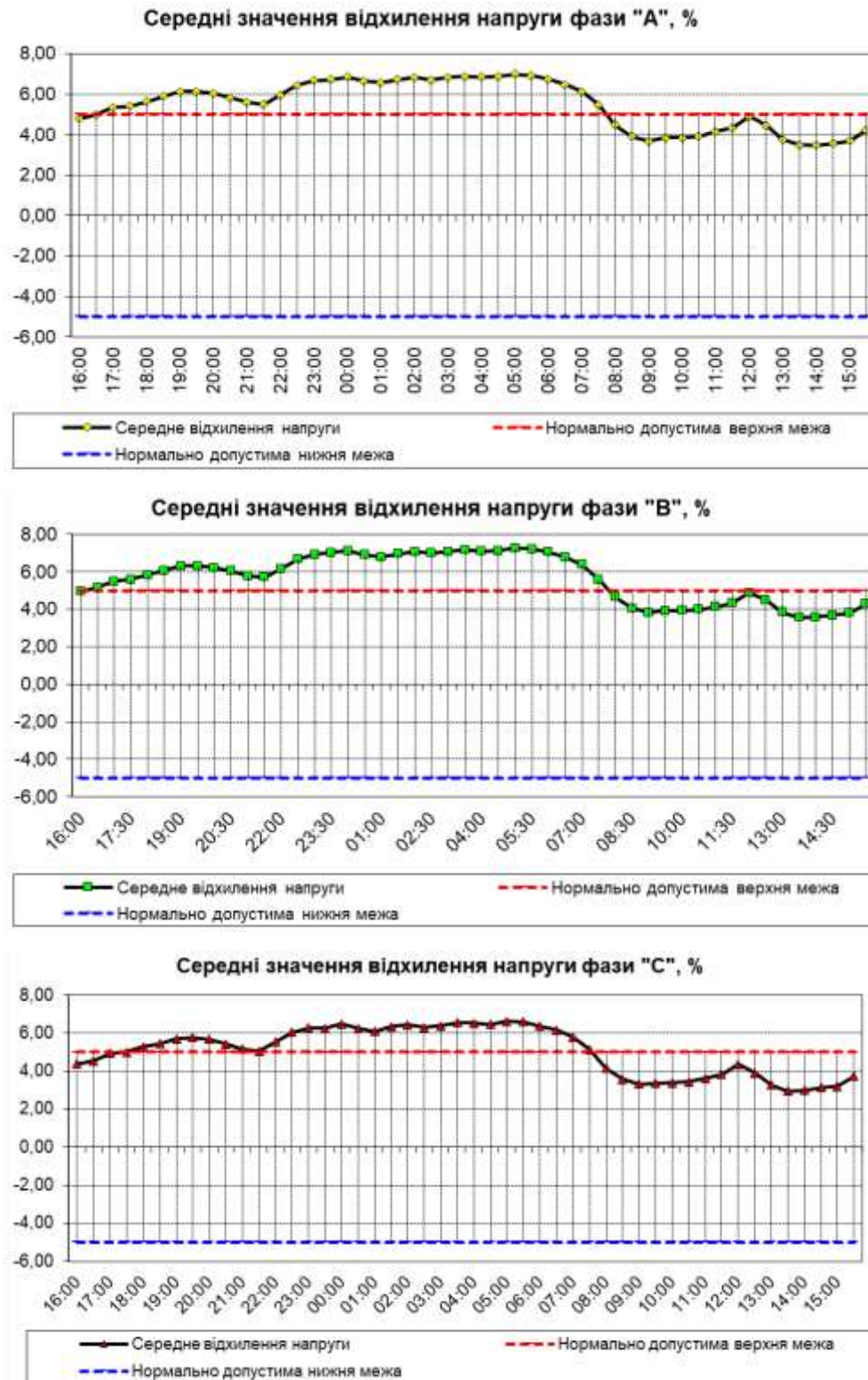


Рисунок Б.15 – Середня напруга по фазах А, В, С. Протокол замірів: ПС 110/10

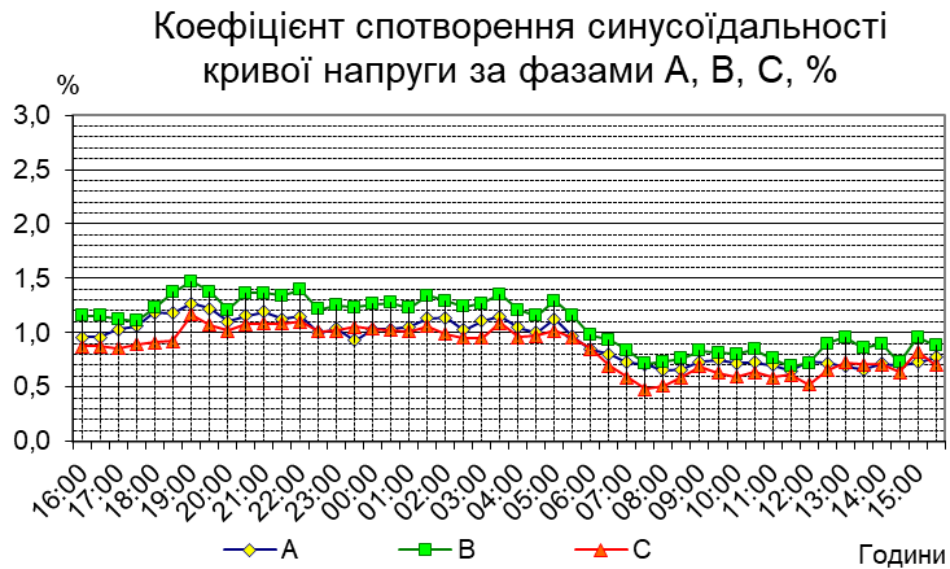


Рисунок Б.16 – Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги за фазами А, В, С,

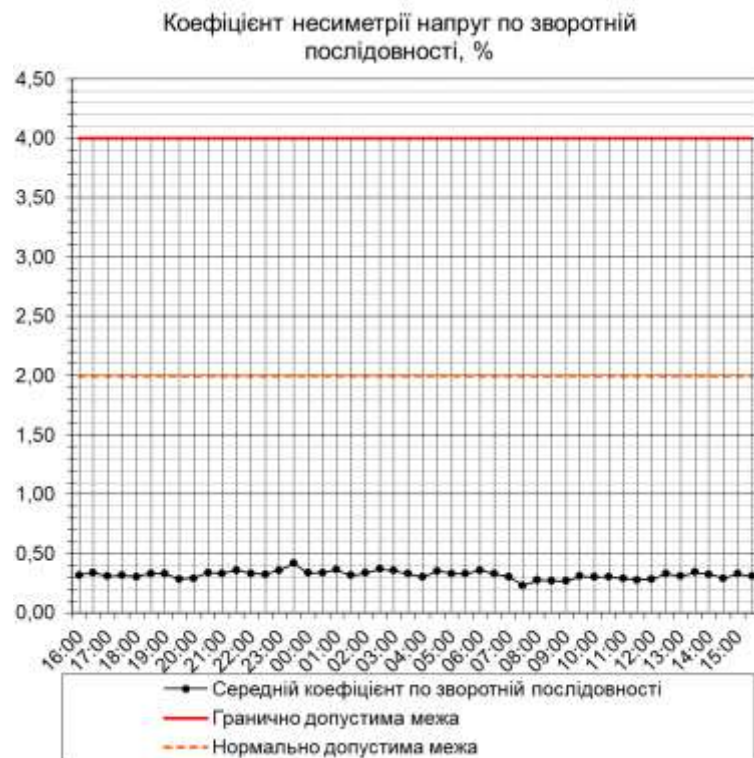


Рисунок Б.17 – Коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю



Рисунок Б.18 – Коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю

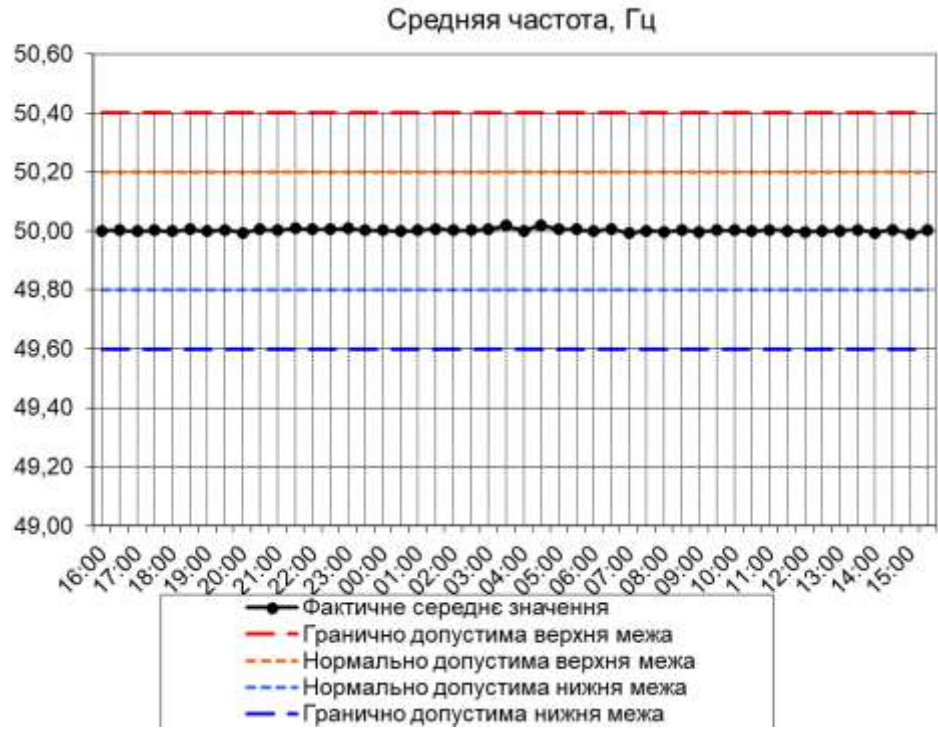


Рисунок Б.19 – Відхил частоти

Додаток В Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1 **Лука, О. В.** Вплив межових значень теплопостачання на якість електричної енергії. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, 2025. Т.2, №25 С. 54-61, URL: <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2025-25-2-6> (Фахове видання категорії Б)

URL: <https://elar.tsatu.edu.ua/items/1063d545-9f43-4240-b6b4-a155a405b47f>

(Наказ МОН України № 920 від 26.06.2024, Б)

2 Якість електричної енергії як функція зв'язаного енергоспоживання міських енергомереж/ О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, С. В. Швець, **О. В. Лука**, Є. О. Кауркін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Х.: НТУ «ХПІ», 2022. – № 2. – С. 60–65 <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2022.2.10> (Фахове видання категорії Б)

URL: <https://gm.khpi.edu.ua/article/view/272590>

(Наказ МОН України № 920 від 26.06.2024, Б)

3 Підвищення надійності електроенергетичних об'єктів за рахунок використання безпілотних літальних апаратів / О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, **О. В. Лука**, Є. О. Кауркін // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати: зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Х.: НТУ «ХПІ», 2023. – № 1. – 96 с. С 87-93 doi: 10.20998/2411-3441.2023.1.15 (Фахове видання категорії Б)

URL: <https://gm.khpi.edu.ua/article/view/288526/282172>

(Наказ МОН України № 920 від 26.06.2024, Б)

4 Sokol, Y., Babak, V., Zaporozhets, A., Gryb, O., Karpaliuk, I., **Luka, O.** (2024). Influence of Corona Discharge on Electric Power Supply Parameters. Studies in Systems, Decision and Control, vol 5 09. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_2 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-44025-0_2

Electronic ISSN 2198-4190

Print ISSN 2198-4182

Print ISBN978-3-031-44024-3

Online ISBN978-3-031-44025-0

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

5 Zaporozhets, A., Babak, V., Starenkiy, V., Gryb, O., Karpaliuk, I., **Luka, O.** Instruments for Identification of Corona Discharge Presence by Spectral Characteristics of Acoustic Radiation Studies in Systems, Decision and Control., 2024, 509, pp. 113-136 DOI: 10.1007/978-3-031-44025-0_6 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-44025-0_6

Electronic ISSN 2198-4190

Print ISSN 2198-4182

Print ISBN978-3-031-44024-3

Online ISBN978-3-031-44025-0

6 Визначення коронного розряду в електричних мережах із застосуванням безпілотних літальних апаратів з метою підвищення якості електропостачання: монографія / Є. І. Сокол, І. Т. Карпалюк, О. Г. Гриб, А.О. Запорожець, Г.А. Сендерович, С.В. Швець, В.В. Скопенко, Д.А. Гапон, О.Ю. Заковоротний, В.П. Старенький, Н.С. Захаренко, Н.М. Шматько, **О.В. Лука**, Є.О. Кауркин, О.Д. Светелик, В.І. Васильченко, О.О. Светелик, Ю.К. Воцинський, Р.І. Дем'яненко. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 301 с.

ISBN 978-617-8009-41-0

(Затверджено до друку вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» як монографію зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Протокол №8 від 03.09.2021р.)

7 Несинусоїдальні і несиметричні режими в електроенергетичних системах / Є. І. Сокол, Г. А. Сендерович, О.Г. Гриб, Т.С. Донецька, А. О. Запорожець, В. В. Скопенко, І. Т. Карпалюк, Д. А. Гапон, О. Ю. Заковоротний, В. Є. Кривоносов, В. П. Старенький, Н. С. Захаренко, **О. В. Лука**, С. С. Козлов. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 202 с.

ISBN 978-617-8009-38-0

(Затверджено до друку вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» як монографію зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Протокол №7 від 02.07.2021р.)

8 Цифровий облік електричної енергії з урахуванням показників її якості та визначенням відповідальності за погіршення: монографія / Є. І. Сокол, Д. А. Гапон, О. Г. Гриб, А. О. Запорожець, І. Т. Карпалюк, В.В. Скопенко, О.Ю. Заковоротний, Н.В. Рудевіч, В.П. Старенький, Н.С. Захаренко, Н.М. Шматько, О.В. Лука, **Є.О. Кауркин**, О.Д. Светелік, В.І. Васильченко, О.О. Светелік, Ю.К. Вошинський, Р.І. Дем'яненко / Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 330 с.

ISBN 978-617-8009-47-2

(Затверджено до друку вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» як монографію зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Протокол №9 від 24.09.2021р.)

9 Сокол Є. І. Релейний захист та автоматика в енергетиці і транспорті: монографія / Є. І. Сокол, О. Г. Гриб, І. Т. Карпалюк, В. М. Баженов, А. О. Запорожець, Д.А. Гапон, В.П. Старенький, В.В. Скопенко, В.І. Васильченко,

О.Ю. Заковоротний, С.В. Швець, О.О. Светелік, Р.М. Лісиченко, Т.С. Донецька, Р.І. Дем'яненко, Є.О. Кауркін, **О.В. Лука**/ Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2023. – 504 с :

ISBN 978-617-8009-93-9

(Рекомендовано вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» протокол №01 від 27.01.2023р., як монографію зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.)

10 Сокол Є. І. Релейний захист в системах електропостачання: монографія / Є. І. Сокол, В. Є. Кривоносов, О. Г. Гриб, І.Т. Карпалюк, А.О. Запорожець, В.П. Старенький, В.В. Скопенко, О.Ю. Заковоротний, Р.М. Лисиченко, Є.О. Кауркін, **О.В. Лука** / Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук, професора Сокола Є. І. – Х.: ФОП Бровін О. В., 2023. – 426 с.

ISBN 978-617-8009-96-0

(Рекомендовано вченою радою Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» протокол №01 від 27.01.2023р., як монографію зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.)

11 **Лука О. В.**, Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Представлення взаємопов'язаності енергій через їх якість / Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей XXX міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2022, 19-21 жовтня 2022 р. / за ред. проф. Сокола Є.І. – Харків: НТУ «ХПІ». – 1107 с. – С. 81

<https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/01/Zbirnik-tez-MicroCAD-2022.pdf>

12 Лука О. В., Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Лисиченко Р. М.
ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЗВ'ЯЗАНОГО ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ МІСЬКИХ
ЕНЕРГОМЕРЕЖ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ / Електроенергетика,
електромеханіка та технології в АПК: [Електронний ресурс] : Матеріали Міжнар.
наук.-практ. конф., 22 грудня 2022 р. / Держ. біотехнологічний ун-т. – Х.: 2022. –
214 с.– С. 11-12

<https://repo.btu.kharkiv.ua/items/9d91df2d-68d8-4815-b9be-36cf41216e88>

Додаток Г Акти впровадження результатів дослідження

Комунальне підприємство
"ХАРКІВСЬКИЙ МЕТРОПОЛІТЕН"

Україна, 61012, м. Харків, вул. Різдвяна, 29
тел.: +38(057) 730-34-06; 731-59-83
E-mail: s@metro.kharkiv.ua



Communal Enterprise
"KHARKIVSKY METROPOLITEN"

29, Rizdviana Street, Kharkiv, 61012, Ukraine
phone: +38(057) 730-34-06; 731-59-83
E-mail: s@metro.kharkiv.ua



« 12 » вересня 2025 р.
на № _____ від _____

№ 03/2366.1/01-09

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи
Лука Олексія Володимировича

**«Методи та засоби обліку електричної енергії в електротехнічних
комплексах при наявності вищих гармонік»**

Цим актом підтверджується, що у 2024 році використано результати, що отримані в дисертаційній роботі Лука Олексія Володимировича «Методи та засоби обліку електричної енергії в електротехнічних комплексах при наявності вищих гармонік», впроваджені при проведенні моніторингу якості електроенергії на ПС 110 кВ КП «Харківський метрополітен».

На шинах ПС 110 кВ зафіксовано перевищення нормально допустимих значень за коефіцієнтами 3-ї, 5-ї та 7-ї гармоніки складової напруги. Джерело вищих гармонік визначено згідно з рекомендаціями дисертації – перевищення потужності споживання абонентами над нормальним для цього періоду року, по причині використання електричної енергії в якості джерела тепла. Зроблено висновки щодо впливу гармонічних збурень в електричній мережі на показання приладів обліку електричної енергії. На запропонованих дослідником рекомендаціях розроблені заходи по зменшенню наявності гармонічних складових, що призвело до покращення відповідності показань приладів обліку і зменшення втрат електричної енергії в мережі

Головний інженер метрополітену
12 09 2025

Ігор ДЕМ'ЯНЕНКО

ТОВ «ЕНЕРГОБУД-1»

Товариство з обмеженою відповідальністю «Енергобуд-1»
вул. Університетська, будинок 24/1, 4 поверх № 14 в літ. А-6, місто Харків,
Харківська обл., Україна т./(факс) ,+38(066) 801 44 95
код ЄДРПОУ 40079474
Платник податку на прибуток на загальних підставах

АКТ

про практичне впровадження результатів дослідження
Лука Олексія Володимировича
щодо методів та засобів обліку електричної енергії в електротехнічних
комплексах при наявності вищих гармонік

ТОВ «ЕНЕРГОБУД-1» (м.Харків) засвідчує високий рівень теоретичних та аналітичних положень дослідження Лука О.В., використаних при розробці **методів та засобів обліку електричної енергії в електротехнічних комплексах при наявності вищих гармонік** і доцільність впровадження алгоритму обробки пов'язаних даних теплової і електричної енергій.

Обладнання для моніторингу електричної мережі на наявність гармонічних спотворень дозволило отримати дані, на аналізі яких за запропонованим алгоритмом було визначено обсяги надспоживання електричної енергії що дало змогу пояснити не відповідність показань приладів обліку електричної енергії.

На розробленому алгоритмі обробки пов'язаних даних теплової і електричної енергії передбачено створення програмного забезпечення для впровадження під час реконструкції підприємства. Запропоновані здобувачем рекомендації дозволили підвищити ефективність використання електричної енергії

Директор
ТОВ «ЕНЕРГОБУД-1»
02 06 2025



Олександр Кудрявський
МП

ТОВ "ПСК Енергобуд"

Харківська обл., м.Харків, вул.П.Шлях,буд.36, кв.7 код ЄДРПОУ 36191288 п/р UA
893003460000026005019195901 в ПАТ «СЕНС-БАНК» в м.Київ, МФО 300346, п/р
№UA323802810000026007000000246 в АТ "БАНК ІНВЕСТИЦІЙ ТА ЗАОЩАДЖЕНЬ" в м.Харків, МФО
380281 ІПН 361912820291, св-во ПДВ № 200108317, тел./факс (057)7604529

АКТ

**про практичне впровадження результатів дослідження Лука Олексія
Володимировича на тему «Методи та засоби обліку електричної енергії в
електротехнічних комплексах при наявності вищих гармонік»**

ТОВ «ПСК Енергобуд» засвічує, що експертна група компанії розглянула матеріали дисертації Лука О.В., і відзначає, що робота здобувача направлена на підвищення відповідності показань приладів обліку електричної енергії при наявності гармонічних збурень в електричній мережі, має високий рівень теоретичних та аналітичних положень дослідження. Робота актуальна. Розроблений алгоритм обробки даних електричної і теплової енергії за умови пов'язаності таких даних достатньо формалізований, що дає змогу розробити програмне забезпечення. Запропоноване здобувачем обладнання одночасного збору даних теплової і електричної енергії, а також програмне забезпечення, що дозволяє обробляти отримані пов'язані дані вважається доцільним для впровадження.

Директор
ТОВ «ПСК Енергобуд»
20.06.2025р.



Криничанська Г.П.