НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
Інститут загальної енергетики

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАУРКІН Євген Олексійович

УДК 621.316.925:621.31:658.26

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ І ЗАСОБИ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ПРОВАЛІВ НАПРУГ НА ТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ПІДПРИЄМСТВ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня
ступеня доктора філософії

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

Є. О. Кауркін

Науковий керівник:
Карпалюк Ігор Тимофійович,
доктор технічних наук, професор

Київ – 2026

АНОТАЦІЯ

Кауркін Є. О. Методи і засоби зменшення впливу провалів напруг на технічні комплекси підприємств теплопостачання. – 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 наукової задачі підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення провалів напруги в мережі через зниження понаднормативного споживання електроенергії на основі точного регулювання рівня теплопостачання.

Об'єкт дослідження: є провали напруги в електричній системі та їх вплив на електротехнічне обладнання підприємства теплопостачання.

Предмет дослідження: є способи виявлення, аналізу та контролю провалів напруги в електричній мережі підприємства теплопостачання.

У *вступі* обґрунтовується актуальність теми дослідження, яка безпосередньо випливає з високих вимог до якості електричної енергії в електричній системі підприємства теплопостачання. Описуються проблеми, пов'язані з провалами напруги в електричній мережі, та їхній вплив на роботу електротехнічного обладнання.

У *першому розділі* наведено теоретичну основу дослідження, визначено актуальність теми. У цьому розділі сформульовано причини виникнення провалів напруги в розподільних електричних мережах, їхній вплив на роботу різного електроустаткування та визначено завдання, які необхідно вирішити для зменшення впливу провалів напруги. Приділено увагу впливу провалів напруги на надійність і ефективність електроенергетичної системи, а також визначено потенційні шляхи їх усунення.

У *другому розділі* представлено огляд сучасних засобів зменшення впливу провалів напруги, їх будову та принципові схеми. Показано недоліки існуючих

апаратних засобів зменшення впливу провалів напруги різних систем і виробників. Зроблено висновок, що лише технічними засобами вирішити проблему впливу провалів напруги неможливо, тому необхідні додаткові заходи щодо зменшення впливу провалів напруги в електричній мережі.

У *третьому розділі* проведено аналіз існуючих заходів загального підвищення якості електричної енергії, що включають також істотне зменшення провалів напруги. На теплопостачальному підприємстві проаналізовано виникнення провалів напруги в електричній мережі у порівнянні з обсягами відпущеної теплової енергії. Аналіз даних показав наявність зв'язку між відпущеною споживачам тепловою енергією та провалами напруги. Проведено огляд математичних моделей і методів моніторингу властивостей динамічних процесів. Дані систем збору інформації обсягів теплової і електричної енергій представлено у вигляді часових рядів. Розроблено метод виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов'язаних потоках теплової та електричної енергії. Адекватність методу виявлення провалів напруги перевірено на тестових прикладах. Проведено аналіз реальних даних споживання теплової і електричної енергії одного району міста за астрономічний рік. В результаті проведеного аналізу було виявлено режими під час яких виникають провали напруги, було виявлено час появи, довжина періоду небезпечних режимів і кількість енергії для недопущення провалів. Ці дані є основою для точного регулювання теплопостачання із результатом недопущення надспоживання електричної енергії і як наслідок припинення провалів напруги.

Четвертий розділ присвячено економічним розрахункам способу застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг в електричній мережі. Використано методику розрахунку збитків в електроенергетичній системі теплопостачаючого підприємства від низької якості електричної енергії. Також виконано розрахунок точки беззбитковості від впровадження спосіб

застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг в електричній мережі.

У *висновках* наведено основні результати наукової роботи щодо вирішення поставлених у дослідженні наукових задач.

Отримано такі основні *наукові результати*:

– вперше розроблено метод виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов’язаних потоках теплової та електричної енергії, **що дало змогу** зменшити кількість провалів напруги та підвищити ефективність використання електричної енергії;

– вперше розроблено спосіб виявлення провалів напруги із зворотнім зв’язком по цільовому параметру і процедурою підготовки даних під вимоги розробленого методу, **що дало змогу** визначити необхідні засоби та заходи для його реалізації.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

1 Зменшено кількість провалів напруги за допомогою методу виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов’язаних потоках теплової та електричної енергії

2 Отримано технічні рішення по впровадженню методу виявлення провалів напруги для зменшення провалів напруг в електричній мережі

3 Підвищено енергоефективність споживання електроенергії за рахунок використання зв’язного енергопостачання.

Результати дисертаційної роботи використані на КП «Харківські теплові мережі» при впровадженні методів та засобів для аналізу провалів напруги в електричній мережі підприємства впроваджено в КП «Харківські теплові мережі», що підтверджено актами про впровадження від 01.05.2025 р., акт про впровадження від 11.07.2025 р., акт про впровадження від 07.12.2025 р.

Ключові слова: енергетична система, електрична мережа, якість електричної енергії, провали напруги, методи діагностики, математичне моделювання, моніторинг режимів, режими теплопостачання, взаємопов’язане енергопостачання.

ABSTRACT

Kaurkin E. O. Methods and Means for Reducing the Impact of Voltage Sags on Technical Complexes of District Heating Enterprises. – Qualification work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 141 – Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics. National Academy of Sciences. Institute of General Power Engineering, Ukraine, Kyiv 2026.

The dissertation is devoted to solving the scientific problem of improving the quality of electrical energy by reducing voltage sags in the network through the reduction of non-standard electricity consumption based on precise regulation of the heat supply level.

Object of the research: voltage sags in the electrical system and their impact on the electrical equipment of a district heating enterprise.

Subject of the research: methods for the detection, analysis, and control of voltage sags in the electrical network of a district heating enterprise.

The *introduction* substantiates the relevance of the research topic, which directly follows from the high requirements for electrical energy quality in the power system of a district heating enterprise. It describes the problems associated with voltage sags in the electrical network and their impact on the operation of electrical equipment.

The *first chapter* presents the theoretical foundation of the research and establishes the relevance of the topic. It formulates the causes of voltage sags in distribution electrical networks, their impact on the operation of various electrical equipment, and identifies the tasks that must be addressed to reduce their influence. Particular attention is given to the effect of voltage sags on the reliability and efficiency of the power system, as well as to identifying potential ways for their mitigation.

The *second chapter* presents a review of modern means for mitigating the impact of voltage sags, including their structure and basic circuit configurations. The shortcomings of existing hardware-based solutions from various systems and manufacturers are identified. It is concluded that the problem of voltage sag impact

cannot be resolved solely by technical means; therefore, additional measures are required to reduce their influence in the electrical network.

The *third chapter* presents an analysis of existing measures for overall improvement of electrical energy quality, including a significant reduction of voltage sags. At a district heating enterprise, the occurrence of voltage sags in the electrical network is analyzed in comparison with the volumes of supplied thermal energy. The data analysis revealed a relationship between the amount of thermal energy delivered to consumers and the occurrence of voltage sags. A review of mathematical models and methods for monitoring the properties of dynamic processes is carried out. Data from information acquisition systems on thermal and electrical energy flows are presented in the form of time series. A method for detecting voltage sags in the electrical network of a district heating enterprise is developed based on singular spectrum analysis of interrelated thermal and electrical energy flows. The adequacy of the proposed method is verified using test examples. An analysis of real data on thermal and electrical energy consumption for a city district over a full calendar year is performed. As a result, operating regimes during which voltage sags occur are identified, including the time of occurrence, the duration of hazardous periods, and the amount of energy required to prevent voltage sags. These results form the basis for precise regulation of heat supply, enabling the prevention of excessive electricity consumption and, consequently, the elimination of voltage sags.

The *fourth chapter* is devoted to the economic evaluation of the proposed approach for implementing the voltage sag detection method in the electrical network. A methodology for calculating the economic losses incurred by the power system of a district heating enterprise due to poor electrical energy quality is applied. In addition, a break-even analysis of the proposed implementation approach for the voltage sag detection method is performed, confirming the economic feasibility of its deployment.

The conclusions present the main results of the scientific work aimed at solving the research problems formulated in the study.

The following main *scientific results* were obtained:

– for the first time, a method for detecting voltage sags in the electrical network of a district heating enterprise has been developed using singular spectrum analysis of interrelated thermal and electrical energy flows, which made it possible to reduce the number of voltage sags and improve the efficiency of electrical energy use;

– for the first time, a practical approach for implementing the proposed voltage sag detection method in the electrical network has been developed, which made it possible to determine the required set of equipment for its realization and to calculate the economic efficiency indicators of its implementation.

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

1. The number of voltage sags has been reduced through the application of a method for detecting voltage sags in the electrical network of a district heating enterprise based on singular spectrum analysis of interrelated thermal and electrical energy flows.

2. Technical solutions for implementing the voltage sag detection method aimed at reducing voltage sags in the electrical network have been developed.

3. The energy efficiency of electricity consumption has been improved through the use of integrated (interconnected) energy supply.

The results of the dissertation research have been implemented at the municipal utility “Kharkiv Thermal Networks” in the application of methods and tools for analyzing voltage sags in the enterprise’s electrical network. The implementation at “Kharkiv Thermal Networks” is confirmed by implementation acts dated 01.05.2025, 11.07.2025, and 07.12.2025.

Key words: power system, electrical network, power quality, voltage dips, diagnostic methods, mathematical modeling, mode monitoring, heat supply modes, interconnected power supply.

ПУБЛІКАЦІЇ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Публікації у наукових фахових виданнях України:

1 **Кауркін, Є. О.** НИЗЬКА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТЕПЛОПОСТАЧАЮЧОГО ПІДПРИЄМСТВА. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, Vol 25, no 2, May 2025, pp 37-44, doi:10.32782/2078-0877-2025-25-2-4. (Фахове видання категорії Б)

2 **КАУРКІН, Є.**; КАРПАЛЮК, І. Використання сингулярного аналізу для визначення часу і величини надспоживання електричної енергії. Системні дослідження в енергетиці, n. 2 (86), p. 31-41, 30 Трав 2026. https://doi.org/10.15407/srenergy2026.02.031 (Фахове видання категорії Б)

(0,8 друк. арк., особистий внесок здобувача: опис основних математичних методів для обробки часових рядів, розробка методики застосування сингулярного розкладання для виявлення та аналізу структурних змін часових рядів даних споживання теплової і електричної енергії, збір та аналіз вихідних даних, опис результатів дослідження, 0,6 друк. арк.. Карпалюк І.Т – формування методичних підходів, постановка мети та завдань, загальне наукове керівництво, 0,2 друк. арк..)

Публікації у наукових фахових виданнях що індексуються у Scopus:

3 Detection of Corona Discharge in Power Supply System Sokol, Y., Babak, V., Zaporozhets, A., Gryb, O., Karpaliuk, I., **Kaurkin, Y**. Studies in Systems, Decision and Control., 2024, 509, pp. 43–56 https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_3 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

(0,6 друк. арк., особистий внесок здобувача: проведення досліджень по визначенню коронного розряду за допомогою інфрачервоного приладу Fluke TiX580, 0,1 друк. арк.. Сокол Є.І. – формування загально наукової ідеї дослідження, постановка мети та завдань, загальне наукове керівництво, 0,1 друк. арк.. Бабак В.П. – збір інформації і проведення досліджень по оптичному

випроміненню ультрафіолетового спектру коронного розряду, 0,1 друк. арк.. Запорожець А.О. – збір інформації і опис методів оцінки електромагнітного випромінення від коронного розряду в електричній системі, 0,1 друк. арк. Гриб О.Г. – формування методичних підходів, розробка аналіз тенденцій обрахування втрат на коронному розряді за умови поганої погоди, 0,1 друк. арк.. Карпалюк І.Т. – збір та аналіз вихідних даних, узагальнення практичних прикладів, підготовка ілюстративних матеріалів, 0,1 друк. арк..)

Публікації апробаційного характеру:

4 Economic Effect of the Use of the Method of Diagnosing the State of Power Lines at the Expense of UAVs Gryb, O., Karpaliuk, I., Babak, V., Starenkiy, V., Zaporozhets, A., **Kaurkin, Y**. Studies in Systems, Decision and Control., 2024, 509, pp. 201–226 DOI: 10.1007/978-3-031-44025-0_10 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

5 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.l0 (Фахове видання категорії Б)

6 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 https://doi.org/l0.20998/2411-3441.2022.2.10 (Фахове видання категорії Б)

7 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. Вощинський, Р.І. Дем'яненко. – Харків: ФОП Бровін О.В., 2021. – 301 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. Вощинський, 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. Лісіченко, 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 доповідей на конференціях

11 **Кауркін Є.О.**, Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Вплив провалів напруги на роботу станцій підкачки теплоносія / 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. 74

12 **Кауркін Є.О.**, Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ МІСТА / 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. 5-6

ЗМІСТ

Перелік познак та скорочень 15
Вступ 16
Розділ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПОКАЗНИКІВ ПРОВАЛІВ НАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЇХ ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЮЧЕ ОБЛАДНАННЯ 22
1.1 Якість електричної енергії 22
1.2 Провали напруги: визначення, класифікація та особливості 23
1.3 Класифікація провалів напруги 25
1.4 Методи аналізу і виявлення провалів напруг 27
1.5 Вплив провалів напруг на електричне обладнання підприємства 30
1.6 Експериментальні дослідження показників якості електричної енергії в мережі теплопостачального підприємства 32
Висновки по розділу 1 36
Розділ 2 ОГЛЯД ЗАХОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ 37
2.1 Причини виникнення провалів напруги в електричній мережі 37
2.2 Заходи по зменшенню впливу провалів напруг в електричній мережі . 42
2.3 Загальна класифікація приладів зменшення провалів напруг 45
2.4 Методи підвищення стійкості насосного обладнання до провалів напруги 50
2.5 Запропонований до використання прилад компенсації провалів напруг SAGFiGHTER™ від компанії UST 52
Висновки по розділу 2 57
Розділ 3 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ПРОВАЛІВ НАПРУГ В МЕРЕЖАХ ТЕПЛОПОСТАЧАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ 58
3.1 Зменшення впливу провалів напруг за рахунок припинення надспоживання електричної енергії 58
3.2 Математичні методи для вирішення задач моніторингу технічних систем 68

3.3 Розробка методу виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов'язаних потоках теплової та електричної енергії 71
3.4 Перевірка достовірності запропонованого методу пошуку «розладнання» 81
3.5 Обробка реальних даних споживання електроенергії запропонованим методом 83
Висновки по розділу 3 92
Розділ 4 ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ 94
4.1 Основні моменти методики обрахунку економічних збитків від неякісної електричної енергії 94
4.2 Розрахунок беззбитковості запропонованого методу виявлення провалів напруги в електричній мережі 95
Висновки по розділу 4 105
ВИСНОВКИ 106
Список використаних джерел 108
ДодаткИ 122
Додаток А Результати замірів показників якості електричної енергії в розподільній мережі 122
Додаток Б Перевірка методу визначення розладки на тестовому прикладі із сильною роздільністю 148
Додаток В Перевірка методу визначення розладки на тестовому прикладі із слабою роздільністю 170
Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації 177
Додаток Д Акти впровадження 181

ПЕРЕЛІК ПОЗНАК ТА СКОРОЧЕНЬ

ЯЕЕ – якість електричної енергії

ПЯЕЕ – показники якості електричної енергії

СКЗ – середньоквадратичне значення

КТП – комплектна трансформаторна підстанція

ППП – пристрої плавного пуску

ПЧ – перетворювачі частоти

КЗ – коротке замикання

ЕЕ – електрична енергія

АРН – автоматичне регулювання напруги

ДБЖ – джерела безперебійного живлення

DVR – dynamic voltage restorer

PWM – pulse width modulation

STATCOM – static synchronous compensator

FACTS – flexible AC transmission systems

ВСТУП

Актуальність теми. Енергетична система України характеризується значним ступенем зносу обладнання. Це зумовлює суттєві складності у підтриманні нормативних показників якості електричної енергії. Водночас у світовій практиці вимоги до якості електричної енергії постійно зростають. Якісна електрична енергія є важливою передумовою забезпечення стабільного функціонування промислових підприємств, оскільки безпосередньо впливає на якість продукції та рівень надання послуг. Окремою проблемою, пов'язаною з якістю електричної енергії, є втрати електроенергії в мережах. Їх зростання призводить до підвищення собівартості електроенергії та зниження конкурентоспроможності підприємств.

Якість електричної енергії була об'єктом досліджень багатьох науковців у галузі енергетики, серед яких слід відзначити: І.В. Жежеленко, А.Ф.Жаркін, О.Г. Гриб, Е.Г. Куреной, В.Г. Кузнецов, Ю.Л. Саєнко, і ряд інших.

Проблема забезпечення якісних показників електричної енергії не може розглядатися як окреме, ізольоване питання. Погіршення якості електричної енергії зумовлюється, з одного боку, діяльністю виробників електричної енергії, а з іншого – значною мірою впливом споживачів. Різні показники якості електричної енергії по-різному впливають на електроенергетичне обладнання підприємств.

Провали напруги в електричній мережі є одним із основних чинників скорочення строку служби електрообладнання та його передчасного виходу з ладу [1, 2, 3, 4]. За даними досліджень, третина втрат на виробництві, зумовлених неякісністю електричної енергії, пов'язана з провалами напруги [5]. При цьому йдеться не лише про втрати продукції.

Дослідження, спрямованого на розробку методів виявлення, аналізу та заходів контролю з метою зменшення впливу провалів напруги, є важливою умовою підвищення надійності та ефективності функціонування підприємств України.

В умовах сучасного розвитку електроенергетичних технологій важливим є забезпечення різними засобами надійної та стабільної роботи виробництва, а також мінімізації впливу провалів напруги.

Таким чином, розробка та впровадження засобів для визначення провалів напруги, зменшення їх впливу на обладнання та попередження їх виникнення є актуальною науково-практичною задачею для проведення досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку досліджень, передбачених Державною науково-технічною програмою «Енергоефективні та ресурсозберігаючі технології генерування, перетворення та використання енергії», а також з науково-дослідними роботами за темою «Дослідження якості електричної енергії в електричних мережах підприємств комунального господарства» (ДР №0123U104279, 2023-2024рр.), де здобувач приймав участь у виконанні окремого розділу «Вплив якісних показників електричної енергії на керованість мережевих насосів».

Мета і задачі дослідження.

Метою дисертаційної роботи є розробка та впровадження нового методу та інструментів для ідентифікації, аналізу та контролю провалів напруги в електричній мережі теплопостачального підприємства (на прикладі КП «Харківські теплові мережі»).

Для досягнення мети поставлені наступні **наукові завдання**:

– визначити основні причини виникнення провалів напруги в електричній мережі підприємства теплопостачання, провести огляд способів та засобів щодо зменшення руйнівного впливу на електричну мережу і електричне обладнання провалів напруг;

– розробити метод зменшення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства на основі концепції взаємопов'язаності енергій;

– розробити спосіб застосування методу зменшення провалів напруги.

практичні завдання:

– провести перевірку працездатності розробленого методу виявлення провалів напруги в електричній мережі підприємства КП «Харківські теплові мережі», та визначити технічні засоби для перевірки працездатності запропонованого методу;

– розробити рекомендації щодо зменшення провалів напруги в електричній мережі із застосуванням розробленого методу і способу його використання.

Об’єкт дослідження: є провали напруги в електричній системі та їх вплив на електротехнічне обладнання підприємства.

Предмет дослідження: є способи виявлення, аналізу та контролю провалів напруги в електричній мережі підприємства.

Методи дослідження:

– статистичний – для аналізу зібраних даних щодо споживання електричної енергії та постачання теплової енергії в одному районі міста за півтора року;

– системного аналізу – для визначення ступеня взаємопов’язаності між різними видами енергії, що споживаються споживачем, а також для розробки метод виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства на основі концепції взаємопов’язаності енергій.

– розрахунковий – для визначення необхідних технічних параметрів заходів, передбачених методом виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства; а також для визначення обсягів необхідної корекції відпуску теплової енергії з метою зменшення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства;

– техніко-економічної оцінки – для визначення величини збитків від провалів напруги та неякісності електричної енергії на підприємстві теплопостачання; оцінювання вартості додатково необхідного обсягу теплової енергії для зменшення провалів напруг; визначення витрат на впровадження заходів, передбачених розробленим методом, а також строку їх окупності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у наступному:

– вперше показано взаємопов’язаність якісних показників споживання теплової і електричної енергії, **що, на відміну від існуючих підходів**, дозволяє використовувати показники якості електричної енергії як джерело додаткової інформації для моніторингу режимів споживання взаємопов’язаних енергетичних ресурсів;

– вперше розроблено метод виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов’язаних потоках теплової та електричної енергії, **що дало змогу** зменшити кількість провалів напруги та підвищити ефективність використання електричної енергії;

– вперше розроблено спосіб виявлення провалів напруги із зворотнім зв’язком по цільовому параметру і процедурою підготовки даних під вимоги розробленого методу, **що дало змогу** визначити необхідні засоби та заходи для його реалізації.

Практичне значення отриманих результатів.

1 Зменшено появу провалів напруги завдяки використанню розробленого методу виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства за допомогою точного регулювання системи керування теплопостачанням

2 Отримано технічні рішення за способом застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг в електричній мережі на основі взаємопов’язаності енергій

3 Підвищено енергоефективність споживання електроенергії за рахунок використання зв’язного енергопостачання.

Особистий внесок здобувача.

Основні результати наукових досліджень, які представлені у дисертаційній роботі та виносяться на захист, отримані автором самостійно.

В публікаціях, які опубліковано у співавторстві, автору належать: [1] – ідея статті, підготовка матеріалів, висновки; [2] – опис основних математичних методів для обробки часових рядів, розробка методики застосування

сингулярного розкладання для виявлення та аналізу структурних змін часових рядів даних споживання теплової і електричної енергії, збір та аналіз вихідних даних, опис результатів дослідження; [3] – проведення досліджень по визначенню коронного розряду за допомогою інфрачервоного приладу Fluke TiX580; [4] – збір матеріалів по підвищенню надійності енергетичних об'єктів за умови обстежень безпілотних літальних апаратів, проведення економічних розрахунків; [5] – огляд математичних моделей і методів для моніторингу властивостей динамічних процесів; [6] – проведення економічних розрахунків використання безпілотних літальних апаратів для підвищення надійності електроенергетичних об'єктів; [7] – розробка заходів по зменшенню втрат від аварійних режимів за рахунок використання БПЛА; [8] – розробка методів визначення дольового вкладу споживача у погіршення показників якості електроенергії на основі емпіричних, аналітичних залежностей та статистичного аналізу; [9] – аналіз і структурування заходів із захисту електроустановок систем електропостачання та електроспоживання, опис вибору захистів електроустановок та проведення їх розрахунку; [10] – підготовка матеріалу по релейному захисту електродвигунів, опис способів виявлення і розпізнавання дефектів ізоляції двигунів працюючих в середовищах підвищеної вологості та пилу і підбір пристроїв для його реалізації;

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: 4 – монографії, 6 – у наукових фахових виданнях (з них включно 2 – у закордонному виданні), 2 – у матеріалах конференції.

Структура і обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації двома мовами, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і чотирьох додатків. Загальний обсяг дисертації становить 183 сторінки,

у тому числі: 121 сторінка основного тексту; список використаних джерел (124 найменування) – на 14 сторінках; додатки – на 62 сторінках. Основний текст містить 27 рисунків і 6 таблиць.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ПОКАЗНИКІВ ПРОВАЛІВ НАПРУГ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ТА МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЇХ ВПЛИВУ НА ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЮЧЕ ОБЛАДНАННЯ

1.1 Якість електричної енергії

З розвитком електричних мереж і технологій трансформації і передачі електричної енергії зростають вимоги до якості електричної енергії. Саме якість електричної енергії (ЯЕЕ) зараз є одним із основних чинником підвищення втрат електричної енергії і скорочення строків роботи обладнання. Які Показники якості електричної енергії (ПЯЕЕ) закріплені в міжнародних і національних стандартах [6, 7, 8, 9], що визначають допустимі межі основних показників якості електричної енергії.

Питанню дослідження впливів ПЯЕЕ на обладнання і режими роботи енергетичного комплексу займалися українські вчені такі як: Жежеленко А.Д., Жаркін А.Ф., Сокол Є.І., Гриб О.Г., Лежнюк П.Д., Стогній Б.С., і закордонні вчені серед яких: Manuel Pérez-Donsión (Іспанія), Gianpaolo Vitale (Італія), Mircea Ion Buzdugan (Румунія), H. Wayne Beaty, Gerald B. Bollen (USA).

Якість електричної енергії характеризується різними показниками серед яких:

- відхилення напруги;
- коливання напруги;
- провал напруги;
- тимчасове перенапруга;
- несинусоїдність напруги;
- імпульсна напруга.

Основна увага в даній роботі була приділена саме наявності провалів напруги в електричній мережі підприємства.

1.2 Провали напруги: визначення, класифікація та особливості

В нормативному документі [8] закріплено, що *Провал напруги* - раптове зниження напруги нижче 0,9 від номінального значення, за яким слідує відновлення напруги до початкового або близького до нього рівня через проміжок часу від десяти мілісекунд до кількох десятків секунд.

В [6] надано наступне визначення: *Провал напруги* (англ. voltage sag або voltage dip) – це короткочасне зменшення діючого значення напруги в електричній мережі до рівня від 0,1 до 0,9 номінального значення тривалістю від 0,5 періоду до 1 хвилини. За визначенням стандарту IEEE 1159, провал напруги характеризується зменшенням ефективного значення напруги на одному або кількох фазних проводах, спричиненим раптовим збільшенням струму навантаження або короткочасним падінням напруги живлення. У стандартах IEC використовується термін voltage dip, під яким розуміють аналогічний процес тимчасового зниження напруги нижче визначеного порогового рівня [10].

Згідно з чинними нормами [8], *провалом напруги* називають: «Тимчасове зменшення середньоквадратичної величини напруги в точці електричної системи електропостачання нижче ніж визначений стартовий поріг». Згідно нормативу визначено і тривалість провалу напруги яка може бути від 10 мс до 1 хв включно. Для трифазних мереж початок провалу починається тоді, коли хоча б одна із фазних напруг спадає нижче ніж стартовий поріг, і закінчується, коли величини напруг всіх фаз рівні або перевищують кінцевий поріг провалу. Також стандартом [8] визначаються наступні характеристики, що описують провали напруги:

Поріг закінчення провалу напруги (voltage dip end threshold) – Середньоквадратична величина напруги в системі електропостачання, яку визначено для встановлення моменту закінчення провалу напруги

Залишкова напруга провалу (voltage dip residual voltage) – Мінімальна зафіксована середньоквадратична величина напруги під час провалу напруги. Цю величину визначають у відсотках від опорної напруги

Поріг початку провалу напруги (voltage dip start threshold) – Середньоквадратична величина напруги в системі електропостачання, яку визначено для встановлення моменту початку провалу напруги

Величина провалу напруги – це мінімальне середньоквадратичне значення, виміряне під час падіння напруги [2], ця велична має також технічну назву – залишкова напруга ($U_{зал}$). Величина $U_{зал}$ виражається як значення у вольтах, у відсотках або як значення еталонної напруги на одиницю – U_{ref} [2]. Величина еталонної напруги складає 90 – 95 % від номінальної напруги.

Для наочності, основні характеристики провалу напруги представлені на рисунку 1.1 [11]:

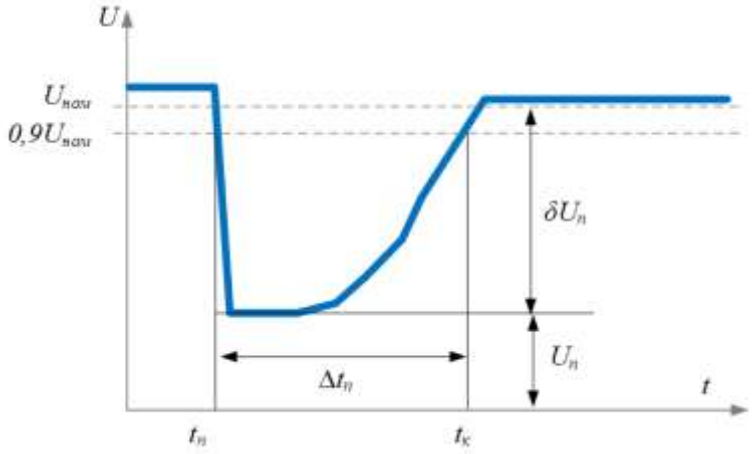


Рисунок 1.1 – Основні характеристики провалу напруги

Наведемо основні співвідношення визначення характеристик провалів напруги [12]:

Глибина провалу δUn визначається за найменшим значенням напруги під час її провалу,

$$\delta U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{ном}} - U_{\text{мін}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\,\%;$$

Амплітуда провалу Un, визначається як відносне найменше значення напруги під час її провалу

$$U_{\text{п}} = \frac{U_{\text{мін}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%;$$

Тривалість провалу Δt_n , визначається як час від моменту зменшення напруги нижче від 90 % до моменту, коли під час відновлення вона стає більшою від цього значення

$$\Delta t_{\text{п}} = t_{\text{п}} - t_{\text{к}};$$

Інтенсивність провалів, визначається до сумарної кількості провалів напруги *M* для визначеної кількості провалів *m* з глибиною $\delta U_{П}$ і тривалістю Δt_n за період *T*,

$$F_{\text{п}} = \frac{m\,(\delta U_{\text{п}}, \Delta t_{\text{п}})}{M} \cdot 100\%.$$

Нормативні вимоги до допустимих параметрів провалів

У міжнародній практиці для оцінювання впливу провалів напруги застосовують:

IEC 61000-4-30 – методи вимірювання;

IEC 61000-4-11 – тестування стійкості обладнання;

IEEE 1159 – класифікація та опис перехідних процесів;

ITIC/CBEMA curve – граничні криві чутливості електронного обладнання.

Для асинхронних двигунів використовуються виробничі довідкові криві (*motor sag ride-through curves*), що вказують допустимі рівні кратності та тривалості провалів напруги. Типові двигуни середньої потужності витримують провал 20 % до 0,5 с без втрати синхронізації, проте глибші провали можуть спричиняти їхню зупинку.

1.3 Класифікація провалів напруги

В науковій літературі провали напруги поділяють на два типи: збалансовані та незбалансовані.

ДСТУ EN 50160-2014 пунктом 6.3.2.4 встановлює класифікацію провалів напруги за залишковою напругою та тривалістю [8]. В IEEE (Інститут інженерів

електротехніки та електроніки) було описано наступні типи провалів напруги, які відповідно промарковано літерами від A до G (табл. 1.1) [13].

Таблиця 1.1 – Характеристики типів провалів напруг

Тип провалу	Мінімальне значення напруги у % від номінального значення	Кількість фаз, де спостерігається провал	Примітка
A	1-10	3	Збалансований
		Незбалансовані	
B	1-10	1	
C	50-70	2	Тривалість в різних фазах може відрізнятись
D	30/90	1+2	2 фази мають провал до 90%, а третя фаза до 30% від номінальної напруги, одночасно
E	Напруга втрачена	1	
F	1-10	2	В різних фазах глибина провалу може бути різною
G	20	1-3	Симетрично

За класифікацією [8] встановлено три типи однофазних незбалансованих провалів напруги в електричній мережі які позначаються літерами B, D і F відповідно [3, 14].

Рівняння що описують формування провалів напруги в залежності від типу провалу описуються системою рівнянь (1.1) [2]:

$$\begin{cases} u_A(t) = h \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi) \\ u_B(t) = h \cdot U \cdot \sin\left(\omega t + \varphi - \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha\right)\right) \\ u_C(t) = h \cdot U \cdot \sin\left(\omega t + \varphi + \left(\frac{2\pi}{3} - \alpha\right)\right) \end{cases} \quad (1.1)$$

де U – номінальна напруга, h – глибина провалу, $0 \leq h \leq 1$

Характеристика типів провалів

Тип *провалу напруги A*. Це такий випадок коли мінімальне значення напруги доходить до рівня 0,1-0,9 від номінального значення напруги. Особливість даного типу провалу в тому, що провал спостерігається у кожній фазі синхронно (одночасно).

Провал типу B. Даний тип провалу напруги є результатом замикання фази і нейтралі. В результаті виникає провал тільки на одній фазі, і величина напруги не перевищує 10% номінального значення.

Провал типу D – є результатом міжфазного замикання або однофазного замикання на землю. В результаті виникає велике падіння напруги на одній із фаз і менше падіння напруги та зсув фазового кута на двох інших фазах. Так Θ провалу $D_A = 90^0$, $D_{BC} = \pm 30^0$. Для провалу напруги типу D є харакетрним, наявність спотворення різної величини у двох фазах.

Провал типу F – двофазне замикання (зазнає навантаження, підключеного трикутником) і не вимірюється на місці несправності. Напруга нульової послідовності дорівнює нулю.

Провал типу C призводить до того, що дві фазні напруги змінюються лише вздовж уявної осі (як за величиною, так і за кутом). Для провалу напруги типу C характерним є одночасне спотворення сигналу у двох фазах, коли амплітуда напруги зменшується до 50-70% номінального значення.

Провал типу E – це двофазне замикання , що виникає при навантаженні, яке підключається так званим шлейфом.

Провал типу G – це двофазне замикання (виникає через навантаження, підключене через незаземлений трансформатор, видаляючи компонент нульової послідовності).

1.4 Методи аналізу і виявлення провалів напруг

Згідно з IEC 61000-4-30, для оцінки провалів напруги застосовують такі параметри: глибина провалу, тривалість, фазність та форма кривої сигналу. Ці параметри дозволяють класифікувати провали та аналізувати їхній вплив на конкретне обладнання. Іноді використовують поняття кривих чутливості обладнання (наприклад, CBEMA або ITIC), які показують допустимі рівні провалів напруги для певних категорій споживачів [15].

Аналіз різних типів провалів напруг можливий з використанням низки методів: – подачі пікового значення; – основної напруги; – середньоквадратичної

напруги; − швидке перетворення Фур’є; − метод фазового автопідстроювання частоти (PLL); − техніка векторного керування (SPLL); − метод вейвлетного перетворення (WT) [16].

Метод середньоквадратичної напруги. Напруга під час провалу обчислюється за статистичними законами за часовими вибірками миттєвих значень напруги. При цьому слід зважити, що середньоквадратичне значення напруги під час провалу змінюється, напруга не відновлюється одразу після падіння і її значення сягає заледве 90 % її номінального значення перед падінням.

Метод основної напруги. Основне значення напруги під час падіння розраховується як функція часу, а аргумент дає стрибок фазового кута. Цей метод передбачає, що в ньому не існує постійного компонента.

Метод пікової напруги. Використовуючи даний метод попередньо приймають, що напруга під час її падіння характеризується постійним середньоквадратичним значенням, зазвичай найнижчою фазною напругою. Проте насправді середньоквадратичне значення змінюється під час провалу.

Техніка вейвлетного перетворення (WT). Вейвлет - перетворення одновимірного сигналу – це подання сигналу у вигляді узагальненого ряду або інтеграла Фур'є по системі базисних функцій, які сконструйовані з материнського (вихідного) вейвлета $\psi(t)$, що має певні властивості за рахунок операцій зсуву в часі (b) і зміни часового масштабу (a). Сигнал у цьому методі можна представити як у часовій, так і в частотній областях. Перевагою цього методу є швидке виявлення наявності спотворення ЯЕЕ. До недоліків можна віднести наступне: труднощі в прямій інтерпретації результатів, потрібен великий обсяг пам’яті для аналізу отриманих даних, метод має часову затримку для виявлення типу провалу, пов’язану з материнським вейвлетом.

Швидке перетворення Фур’є (FFT). Результати вимірювань електричного струму і напруги представляються у вигляді деякої періодичної функції f(t), де t – незалежна змінна. Математичні способи обробки можуть бути використані такі процеси як модуляція, згортка і інші. Отримання достовірної інформації по досліджуваних сигналах можна тільки при використанні Тобто,

можна сказати, що отримати достовірну і правильну інформацію можливо тільки у випадку використання найбільш близької до оригіналу математичної моделі сигналу. Для опису електромагнітних процесів в електроенергетиці використовують гармонійні сигнали, тобто сигнали, основа яких це гармонійна модель, частотна або спектральна. Для цього використовується аналіз Фур'є та його похідні. Безперервні функції завдання сигналу $f(t)$ це в основному математичні об'єкти, так як при зборі інформації про параметри електроенергії мають справу з дискретними значеннями. Для точного визначення величини і фазового кута зсуву напруги живлення, FFT вимагає затримки в процесі виявлення провалу, що наближається до одного циклу після моменту початку провалу. Тому його вважають повільним методом виявлення [17].

Метод фазового автопідстроювання частоти PLL використовується тільки для відстеження частоти та фазового кута напруги живлення і не може відновити інформацію про глибину провалу, і це так непросто реалізувати в реальному часі. Крім того, це не точний метод виявлення і не підходить для умов швидкого виявлення [18].

Метод техніки векторного керування SPLL – це вдосконалення PLL з точки зору швидкості виявлення та засобів реалізації. SPLL можна легко реалізувати в реальному часі за допомогою цифрової обробки сигналів (DSP). Перевагою цього методу є те, що він може запровадити швидкий процес виявлення [19]. Пікове значення методу визначення форми сигналу живлення – простий принцип, прийнятий у цій техніці на основі пікового значення форми сигналу напруги. Це пікове значення напруги порівнюється з бажаним опорним значенням напруги. Якщо різниця між двома значеннями перевищує граничні значення, тоді схема компенсації буде працювати, щоб інжектувати відсутню напругу. Недоліками цієї методики є: затримка часу виявлення може досягати 0,5 с, наявність шуму істотно впливає на процес вимірювання, опорна напруга повинна генеруватися окремо щоб отримати інформацію про фазовий зсув.

Кожен із зазначених методів має свої переваги і недоліки, що визначаються самим методом, це може бути швидкість виявлення провалу, оцінка тривалості

провалу, точність визначення його глибини. Самі методи відрізняються за складністю і вартістю реалізація.

1.5 Вплив провалів напруг на електричне обладнання підприємства

Провали напруги є негативним явищем для енергетичної системи України. Як наведено в [5] найбільша частка відмов обладнання, а саме 31 %, спричинена провалами напруги (рис. 1.2). Провали напруги впливають не лише на такі поширені електричні пристрої, як асинхронні двигуни, а й на більш чутливе обладнання, зокрема персональні комп'ютери, інвертори, пристрої регулювання швидкості обертання асинхронних двигунів, а також різні типи контролерів керування технологічним обладнанням.

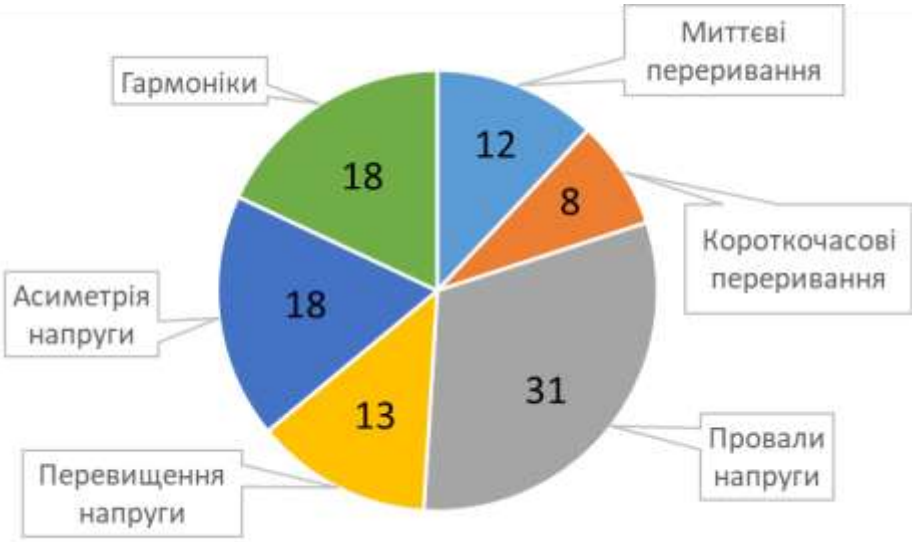


Рисунок 1.2 – Вплив параметрів якості електроенергії на перебої в роботі електричного обладнання

Вплив провалів напруги на електротехнічні та технологічні комплекси є суттєвим [20, 21, 22]. Чутливе обладнання, зокрема асинхронні двигуни, перетворювачі частоти, електронні системи керування та засоби автоматизації, може зазнавати збоїв, аварійних зупинок або виходу з ладу. У насосних агрегатах і приводах теплових та промислових підприємств провали напруги можуть призводити до зменшення електромагнітного моменту на валу, втрати стійкості

роботи двигуна та спрацювання захистів [23], що негативно впливає на надійність виробничих процесів.

Вплив провалів напруг

Провали напруги є одним із найбільш критичних порушень якості електричної енергії у розподільчих мережах промислових підприємств. Основними джерелами таких порушень у системах електропостачання є короткі замикання, струмові кидки під час пуску потужних електродвигунів, перемикання трансформаторів, а також перевантаження мережі [24, 25, 26].

Загалом чутливість електрообладнання до провалів напруги є високою. Провали напруги у вузлах навантаження можуть спричиняти порушення стійкості роботи асинхронних і синхронних двигунів. Зокрема, під час тривалих провалів напруги (тривалістю кілька секунд) за значного зниження напруги можливе «перекидання» (гальмування) асинхронних двигунів, а для синхронних двигунів – випадання із синхронізму [11].

Під час провалу напруги зменшується електромагнітний момент двигуна, який пропорційний квадрату прикладеної напруги.

Таким чином, навіть відносно невелике зниження напруги на 20–30 % призводить до зменшення електромагнітного моменту на 36–50 %. Для насосних агрегатів, що працюють у режимах, наближених до номінальних, це означає зниження продуктивності, можливе порушення стійкості роботи приводу та спрацювання захисних пристроїв:

– зменшення моменту може бути нижчим за момент навантаження;

– двигун переходить у режим ковзання, що зростає;

– можливе зупинення ротора (“stalling”);

– збільшується струм статора, що викликає додаткове теплове навантаження та спрацювання захистів [23, 27].

Дослідження показують, що для асинхронних двигунів середньої потужності (30–160 кВт), типових для теплопостачальних підприємств, провали напруги глибиною 40–60 % тривалістю понад 0,2–0,5 с можуть спричиняти втрату стійкості роботи [28].

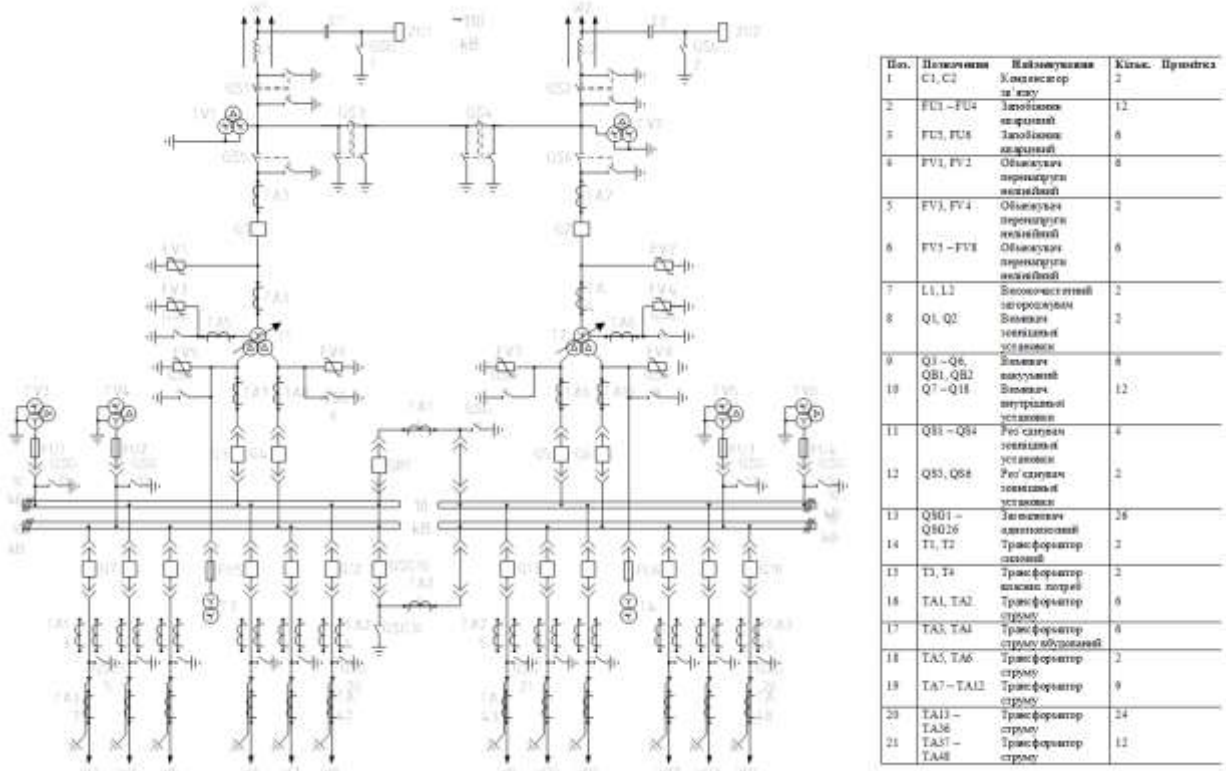
Для теплопостачальних підприємств провали напруги становлять особливу небезпеку, оскільки більшість технологічних процесів, пов’язаних із циркуляцією теплоносія, забезпечується роботою асинхронних двигунів насосного обладнання. Чутливість таких двигунів до глибини та тривалості провалів значною мірою визначає надійність функціонування систем теплопостачання, особливо в пікових режимах навантаження.

1.6 Експериментальні дослідження показників якості електричної енергії в мережі теплопостачального підприємства

Опис об’єкта дослідження. Об’єктом дослідження є система електропостачання підприємства теплопостачання міста (його одного із підрозділів). Були проведені вимірювання ПЯЕЕ у різних точках електричних мереж на межі балансової приналежності між постачальником та споживачами. Дослідження виконувалися на підстанціях енергетичної компанії АТ «Харківобленерго», яка здійснює передачу електричної енергії з шин 110 кВ підстанцій магістральних мереж у мережі побутових, промислових та інших споживачів. Вимірювання ПЯЕЕ проводилися на приєднаннях підстанцій магістральних мереж СМЕС та енергетичної компанії за допомогою мікропроцесорних аналізаторів напруги та струму типу АНТЕС АК-3Ф відповідно до стандартів. Клас точності приладу становить 0,5. Аналізатор забезпечує автоматичне вимірювання нормально допустимих та гранично допустимих значень показників якості електричної енергії.

Схему мережі електропостачання показано на рис. 1.3. Електропостачання підприємства здійснюється від мережі 10 кВ АТ «Харківобленерго» через мережу 0,4 кВ до виробничих об’єктів теплопостачального підприємства. До високовольтної двотрансформаторної підстанції ПС 110/10 кВ підходить двоколова повітряна лінія 110 кВ. Основне живлення здійснюється по кабельних лініях 10 кВ від підстанції ПС 110/10 кВ до трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ. Резервне живлення підрозділу підприємства виконується по кабельних лініях 0,4 кВ від іншої комірки трансформаторної підстанції 10/0,4 кВ. Отже,

підприємство може отримувати живлення двома різними способами – від двох комірок понижувальної підстанції 10/0,4 кВ, що може по-різному впливати на характеристики та інтенсивність провалів напруги.



Поз.	Позначення	Найменування	Кільк.	Примітка
1	C1, C2	Конденсатор зв'язку	2	
2	FU1 – FU4	Запобіжник аварійний	12	
3	FU5, FU6	Запобіжник аварійний	6	
4	FV1, FV2	Обмежувач перенапруги нелінійний	6	
5	FV3, FV4	Обмежувач перенапруги нелінійний	2	
6	FV5 – FV8	Обмежувач перенапруги нелінійний	6	
7	L1, L2	Високочастотний загороджувач	2	
8	Q1, Q2	Вимикач зовнішньої установки	2	
9	Q3 – Q6, QB1, QB2	Вимикач вакуумний	8	
10	Q7 – Q18	Вимикач внутрішньої установки	12	
11	Q81 – Q84	Роз'єднувач зовнішньої установки	4	
12	Q85, Q86	Роз'єднувач зовнішньої установки	2	
13	QS01 – QS026	Заземлювач однополюсний	26	
14	T1, T2	Трансформатор силовий	2	
15	T3, T4	Трансформатор власних потреб	2	
16	TA1, TA2	Трансформатор струму	6	
17	TA3, TA4	Трансформатор струму обмоткований	4	
18	TA5, TA6	Трансформатор струму	2	
19	TA7 – TA12	Трансформатор струму	9	
20	TA13 – TA36	Трансформатор струму	24	
21	TA37 – TA48	Трансформатор струму	12	

Рисунок 1.3 – Схема підстанції 110/10, від якої виконується живлення теплопостачаючого підприємства

До основних споживачів електроенергії підприємства належать електроприводи насосів підкачки теплоносія з короткозамкненими асинхронними двигунами, електропривід компресора та світильники системи штучного освітлення. Усі споживачі підрозділу підприємства отримують живлення на напрузі 0,4 кВ від КТП 10/0,4 кВ по чотирьох кабельних лініях, причому одна пара перебуває в резерві.

Значна частка електродвигунів у сумарному навантаженні (близько 90 %), які забезпечують відповідальні технологічні процеси, зумовлює необхідність дослідження їх стійкості до провалів напруги та здатності збереження працездатності під час їх виникнення.

Під час відхилення ПЯЕЕ від вимог [29 - 33] економічні збитки несе як споживач так і постачальник електричної енергії.

Енергопостачальні компанії несуть відповідальність перед споживачами, так само як і споживачі — перед постачальниками, у разі порушення договірних зобов'язань, у яких визначено відповідальність сторін за надійність електропостачання та рівень якості електричної енергії відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Вимірювання показників якості електричної енергії (ПЯЕЕ) було проведено на двох підрозділах підприємства теплопостачання. Зазначені підрозділи були підключені до різних КТП і не мали електричного впливу один на одного. Дослідження виконувалися в електричних мережах 0,4 кВ та на підстанціях 10/0,4 кВ. Результати вимірювань наведено в додатку А (додаток А.1 — підрозділ №1 підприємства теплопостачання; додаток А.2 — підрозділ №2 підприємства теплопостачання).

Журнал провалів напруги для підрозділу №1 підприємства теплопостачання за період з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00 наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Журнал подій та виходів ПЯЕЕ за нормально та гранично допустимі значення. Журнал провалів напруги

№ п/п	**Дата і час**	**Подія**	**Інформація**
1	09.11.2020 11:26	СТАРТ ВИМІРЮВАНЬ	Вхід напруги: 220 В
			Вхід струму - ТРАНСФОРМАТОР
			ТИП підключення - 3 ФАЗИ U
			Збір статистики Увімкнено
			Період усереднення: 30 МІН
			Масштаб по напрузі: 1.00
			Масштаб по струму: 1.00

19	09.11.2020 11:27	Провал напруги	Фаза: B
			Уставка (%): 90.00 (0.198 кВ)
			Пікове значення (%): 0.18 (0.000 кВ)
			Тривалість: 3.95 СЕК
59	09.11.2020 11:27	Провал напруги	Фаза: C
			Уставка (%): 90.00 (0.198 кВ)
			Пікове значення (%): 0.22 (0.000 кВ)
			Тривалість: 13.51 СЕК
60	09.11.2020 11:27	Провал напруги	Фаза: C
			Уставка (%): 90.00 (0.198 кВ)
			Пікове значення (%): 0.22 (0.000 кВ)
			Тривалість: 2.93 СЕК
157	09.11.2020 14:53	Провал напруги	Фаза: C
			Уставка (%): 90.00 (0.198 кВ)
			Пікове значення (%): 89.55 (0.196 кВ)
			Тривалість: 0.02 СЕК

Загальна кількість подій та виходів ПЯЕЕ за нормально та гранично допустимі значення з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00 становив 1500 випадків (з урахуванням початку запису і кінця записів). З яких було зафіксовано 4 провали напруги (представлені в таблиці 1.2), 845 випадків «Перенапруга» (таблиця наведена в додатку А, табл. А.7), 1305 випадків «Перевищення уставки» (фрагмент таблиці наведено в додатку А, табл. А.8),

Проведений аналіз результатів вимірювань ПЯЕЕ в мережі 0,4 кВ на межі балансової належності між споживачем і постачальником дозволяє зробити висновок, що в електричній мережі теплопостачального підприємства зафіксовано численні порушення ПЯЕЕ, зокрема відхилення фазних напруг і наявність провалів напруги, що не відповідає нормативним вимогам [32].

Обробка матеріалів досліджень ПЯЕЕ на теплопостачальному підприємстві показала, що найбільш поширені провали напруги мають такі характеристики:

– глибина: 10–45 % від номінального значення;

– тривалість: 40–200 мс;

– періодичність появи провалів залежить від режимів роботи мережі, однак зростає в осінньо-зимовий період.

Особливої шкоди провали напруги завдають асинхронним двигунам, які є ключовим електрообладнанням теплопостачального підприємства.

Висновки по розділу 1

Наявність провалів напруги в системі електропостачання завдає шкоди всім споживачам електроенергії в електроенергетичній системі. Провали напруги є однією з ключових причин нестабільної роботи асинхронних двигунів насосного обладнання теплопостачальних підприємств. Їхній вплив проявляється у зниженні електромагнітного моменту двигуна, зменшенні продуктивності насосів, спрацюванні захисних пристроїв та підвищенні аварійності систем теплопостачання. Безперервний моніторинг електричної мережі та впровадження технічних заходів щодо підвищення стійкості обладнання є необхідними умовами забезпечення надійної роботи підприємств теплопостачання. Завдання зменшення впливу провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючих підприємств є актуальним.

Проведені вимірювання показали наявність провалів напруги в електричній мережі на всіх підрозділах підприємства. Враховуючи, що підприємство використовує асинхронні електродвигуни як основне електрообладнання, вплив провалів напруги є найбільш відчутним саме на цьому типі обладнання.

Для зменшення впливу провалів напруги на розподільну мережу та електрообладнання підприємства необхідно провести дослідження заходів щодо зниження їх впливу.

РОЗДІЛ 2 ОГЛЯД ЗАХОДІВ ТА ЗАСОБІВ ЗМЕНШЕННЯ ВПЛИВУ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ

2.1 Причини виникнення провалів напруги в електричній мережі

Провали напруги відносяться до ПЯЕЕ. Підвищенням якості електричної енергії в Україні займалися низка видатних вчених, серед них: Гриб О.Г., Шидловский А.К., Жежеленко І. В., Розанов Ю. К., Барский В.А., і інші.[22 - 46].

У дослідженнях різних учених приділено значну увагу проблемі провалів напруги в електричних мережах, причинам їх виникнення та методам зменшення їх негативних наслідків.

За джерелом [11] визначають причини провалів напруги як: «Провали напруги, як будь-які зниження напруги, що виникають внаслідок одного з двох явищ в електричних мережах – швидкого зростання струму в певній її частині чи раптового збільшення імпедансу системи». У науковій літературі причини виникнення провалів напруги розглядаються під різними кутами. Тому причини їх появи було згруповано та представлено у вигляді структурованого переліку факторів (рис. 2.1). Провали напруги, як правило, супроводжують аварійні або перехідні режими роботи мережі, що робить їх характерним проявом зниження якості електричної енергії.

Рисунок 2.1 – Фактори появи провалів напруги які зустрічаються в літературі

Розглянемо детальніше фактори появи падіння напруги:

Короткі замикання в мережі. Це аварійні режими. Вони можуть мати різні види [47], відповідно відрізняються і їх наслідки. Такі аварійні явища детально досліджені в науковій літературі, зокрема встановлено причини зниження напруги в цих режимах. Узагальнюючи, слід зазначити, що боротьба з короткими замиканнями здійснюється шляхом швидкого відключення пошкоджених ділянок мережі. Водночас точне прогнозування моментів виникнення коротких замикань є неможливим.

Пускові струми потужних асинхронних двигунів. Потужні двигуни, переважно асинхронні, широко використовуються на промислових підприємствах. Такі двигуни є зручними з точки зору підключення до електричної мережі, оскільки не потребують додаткового обладнання, окрім комутаційного апарата (вимикача). Двигун може підключатися безпосередньо до мережі. Заміна таких двигунів є складною, оскільки альтернативні типи електродвигунів, як правило, є дорожчими та конструктивно складнішими. Для зменшення пускових струмів [48, 49] застосовують такі заходи: пристрої плавного пуску (ППП) та перетворювачі частоти (ПЧ), які забезпечують поступову подачу напруги або зниження частоти живлення, а також класичні методи, зокрема перемикання обмоток за схемою «зірка–трикутник» (для двигунів із трикутним з’єднанням обмоток), використання автотрансформаторів або послідовне вмикання резисторів для обмеження струму в статорній обмотці під час пуску. Засоби зменшення пускових струмів:

– пристрої плавного пуску (soft starters). Використовують тиристори для поступового підвищення напруги, що подається на двигун, тим самим обмежуючи пусковий струм. Вони є дешевшими порівняно з перетворювачами частоти для двигунів середньої та великої потужності;

– перетворювачі частоти (VFD). Найефективніший метод, що забезпечує регулювання частоти живлення. Це дозволяє не лише зменшити пусковий струм до рівня, близького до номінального, але й здійснювати керування швидкістю та електромагнітним моментом двигуна.

Сучасні засоби регулювання пускових струмів, як правило, є дорогими, тому на діючих промислових підприємствах України застосовуються обмежено.

Комутаційні процеси силового електрообладнання – це складні перехідні процеси, що виникають під час вмикання, вимикання або зміни режимів роботи електричних кіл із силовим обладнанням (двигунами, трансформаторами, лініями електропередачі). Вони характеризуються стрибкоподібними змінами струмів і напруги, утворенням електричної дуги та залежать від типу навантаження (активного, індуктивного) і параметрів мережі. Такі процеси потребують застосування спеціальних комутаційних апаратів для їх ефективного гасіння та забезпечення безпеки. Комутаційні процеси можуть бути небезпечними, оскільки спричиняють перенапруги та можуть призводити до пошкодження обладнання. Тому їх вивчення є важливим для обґрунтованого вибору та правильної експлуатації комутаційних апаратів, особливо під час роботи з індуктивними навантаженнями, зокрема електродвигунами у режимах пуску та гальмування. [50].

– Струми при пуску та гальмуванні. Під час пуску електродвигунів виникають струми, що значно перевищують номінальні значення, створюючи підвищене навантаження на комутаційні апарати.

– Індуктивні навантаження. Комутація індуктивних навантажень (обмоток електродвигунів, трансформаторів) є складнішою порівняно з активними через наявність накопиченої енергії, що призводить до дугоутворення та стрибків напруги.

– Дугоутворення. Під час розриву електричного кола виникає електрична дуга, яка спричиняє ерозію контактів і може призводити до аварійних режимів. Тому комутаційні апарати повинні забезпечувати ефективне гасіння дуги.

– Перенапруги. Різке розмикання електричного кола (особливо з індуктивним навантаженням) може спричинити виникнення значних перенапруг, що становлять загрозу для ізоляції електрообладнання.

Засоби зменшення провалів напруги, спричинених комутаційними процесами силового електрообладнання, значною мірою збігаються із заходами,

що застосовуються для обмеження впливу пускових струмів великогабаритних асинхронних електродвигунів.

Перемикання трансформаторів – це процес зміни коефіцієнта трансформації шляхом перемикання відводів обмоток з метою регулювання вихідної напруги. Цей процес здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв – перемикачів відводів, установлених на силових трансформаторах. Вони поділяються на два основні типи: під навантаженням (РПН), що забезпечують регулювання без переривання живлення, та без навантаження (ПБВ), які використовуються при відключеному трансформаторі. Це дозволяє адаптувати рівень напруги до вимог електричної мережі [51].

Перемикання трансформаторів призначено для вирівнювання напруги до відповідного номіналу. Можливі різні проблеми використання РПН. Основні проблеми [52]:

– Висока частота комутацій. При використанні РПН як засобу стабілізації напруги (наприклад, за умов постійних коливань) відбувається значна кількість перемикань, що призводить до зниження ресурсу пристрою та може спричинити його відмову.

– Неправильне налаштування. Невірний вибір відгалуження призводить до надмірного зниження або підвищення вихідної напруги, що може спричинити пошкодження обладнання споживачів або порушення нормальних умов його роботи.

– Вихід з ладу механізму перемикання. Може відбуватися внаслідок механічних несправностей, зношування контактів або неправильної роботи приводу.

– Помилки в проекті та експлуатації: Невідповідність характеристик РПН реальним потребам мережі через помилки при проектуванні [53]

Надмірне навантаження ділянок мережі. Перевантаження електричної мережі створює серйозні проблеми, зокрема перегрів провідників, пошкодження ізоляції, виникнення коротких замикань і підвищення ризику пожеж. Крім того, це може призводити до виходу з ладу електрообладнання споживачів унаслідок

відхилень та стрибків напруги. Наслідками є часті спрацювання захисних апаратів, порушення роботи обладнання, економічні збитки та простої [54].

Основні проблеми [55]:

– Пожежна безпека: Перегріті дроти можуть стати причиною займання, перетворюючись на іскру.

– Пошкодження обладнання: Постійні перепади напруги (підвищення або зниження) скорочують термін служби техніки (комп'ютерів, холодильників, телевізорів), спричиняють збої в роботі реле та магнітних систем, а іноді й повністю виводять прилади з ладу.

– Короткі замикання: Пошкоджена ізоляція проводів під впливом перевантаження стає вразливою, що збільшує ймовірність КЗ.

– Економічні втрати: Збитки від заміни техніки, простоїв та необхідності ремонту мережі.

– Зниження якості електроенергії: Погіршення ПЯЕЕ від норми погіршує роботу приладів.

Зовнішні впливи на електричні мережі включають природні фактори (сніг, вологість, низькі температури, сонячна радіація, вітер), технологічні впливи (зокрема роботу інверторів сонячних електростанцій, що впливають на показники якості електричної енергії), а також вплив інших споживачів і джерел генерації. Це зумовлює необхідність забезпечення надійності, безперебійності та відповідності електропостачання нормованим показникам якості, незважаючи на дію зазначених факторів. [55]

Окремо виділяють різні впливи.

– Природні впливи. Кліматичні умови: сніг, волога, мороз, сонячне випромінювання та вітер можуть пошкоджувати зовнішню проводку, ізоляцію та опори ліній електропередач, спричиняючи обриви та коротке замикання. Також впливають погодні явища: грози (блискавки), сильні вітри (падіння дерев), обмерзання проводів.

– Технологічні та експлуатаційні впливи. Нелінійні навантаження: Робота інверторів фотоелектричних станцій може спотворювати форму напруги

(гармоніки) та погіршувати якість електроенергії, що впливає на роботу іншого обладнання: Різкі коливання попиту та пропозиції на електроенергію, особливо при інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Стан мережі: Зношення обладнання, корозія контактів, пошкодження кабелів внаслідок старих пошкоджень.

– Зовнішні техногенні впливи. Людський фактор: Пошкодження мереж під час будівельних робіт, вандалізм. Транспортні засоби: Пошкодження опор ліній електропередач. Пожежі: Займання біля ліній електропередач або трансформаторних підстанцій.

З огляду впливу зовнішніх факторів видно, що основні впливи на неякісність ЕЕ і провали зокрема мають стан обладнання електроенергетичної системи і рівень обслуговування цього обладнання.

В умовах високого рівня зношеності електроенергетичних мереж України, значної частки застарілих трансформаторних потужностей та частих аварійних режимів проблема провалів напруги посилюється. Моніторинг таких подій і їх оцінювання відповідно до стандартів IEEE та IEC є ключовими чинниками підвищення надійності та енергоефективності промислових підприємств.

2.2 Заходи по зменшенню впливу провалів напруг в електричній мережі

Вплив провалів напруги на роботу електрообладнання енергосистеми було розглянуто в розділі 1.3. Зауважимо, що для запобігання або обмеження негативних наслідків необхідна реалізація методичних, організаційних і технічних заходів, спрямованих на поліпшення ЯЕЕ в межах встановлених норм і правил.

Проблемою зменшення впливу провалів напруги займалися відомі вчені у галузі електроенергетики, серед яких: Шидловский А.К., Жаркін А.Ф., Жемеров Г.Г., Жежеленко І.В. і інші.

Узагальнюючи заходи по зменшенню негативного впливу провалів напруг в мережі, їх можна згрупувати по трьом типам (рис. 2.2) [56, 57]:

Рисунок 2.2 – Три типи заходів по зменшенню негативного впливу провалів напруг

Розглянемо їх більш детально.

Технічні заходи на рівні мережі

– Регулювання напруги. Передбачає встановлення пристроїв автоматичного регулювання напруги (АРН) на підстанціях і силових трансформаторах.

– Реконфігурація мережі. Передбачає зміну топології електричної мережі за допомогою комутаційних апаратів з метою перерозподілу навантаження, мінімізації втрат електричної енергії та покращення рівня напруги.

– Модернізація обладнання. Передбачає заміну застарілих трансформаторів на більш енергоефективні та встановлення сучасних пристроїв компенсації реактивної потужності.

– Впровадження систем АСУ ТП. Передбачає застосування автоматизованих систем управління технологічними процесами, що забезпечують оперативне реагування на відхилення рівня напруги в електричній мережі.

Усі перелічені заходи на рівні електричної мережі не можуть бути впроваджені на підприємстві теплопостачання, оскільки воно є споживачем електричної енергії і не має на своєму балансі відповідного мережевого обладнання.

Заходи на рівні споживача

– Стабілізатори напруги. Використання індивідуальних або групових стабілізаторів напруги в будівлях, що забезпечують підтримання рівня напруги в межах, установлених стандартом ДСТУ EN 50160.

– Джерела безперебійного живлення (ДБЖ). Застосування ДБЖ для критично важливого обладнання, що забезпечують його живлення під час короткочасних провалів напруги.

– Оптимізація навантаження. Передбачає уникнення одночасного ввімкнення потужних споживачів, що можуть спричиняти різкі провали напруги в електричній мережі.

– Силова електроніка. Інтеграція сучасних пристроїв, що зменшують вплив нелінійних споживачів на якість електричної енергії.

Деякі з перелічених заходів на рівні споживача можуть бути впроваджені на підприємстві. Зокрема, встановлення стабілізаторів напруги індивідуально для найчутливішого або найвідповідальнішого обладнання може забезпечити позитивний ефект. Водночас застосування стабілізаторів напруги для потужного обладнання підприємства (зокрема насосів) здебільшого є економічно недоцільним, оскільки їх вартість може перевищувати вартість самого обладнання. У зв’язку з цим у практиці частіше використовують не повнофункціональні стабілізатори напруги, а пристрої компенсації (корекції) провалів напруги, які є значно дешевшими. Надалі доцільно зосередитися саме на таких технічних рішеннях.

Що стосується джерел безперебійного живлення (ДБЖ), то вони є не лише високовартісними, але й потребують кваліфікованого технічного обслуговування та відповідної експлуатаційної підтримки. Наприклад, підрозділ обслуговування акумуляторних батарей. Водночас акумуляторні батареї мають обмежений строк експлуатації, який може не залежати безпосередньо від режимів їх використання. Таким чином, застосування ДБЖ як вузькоспеціалізованого засобу компенсації провалів напруги у даному випадку є економічно та технічно недоцільним і не розглядається як основне рішення. Оптимізація навантаження, зокрема недопущення одночасного ввімкнення

двигунів насосів, уже впроваджена на підприємстві та функціонує на практиці. Водночас встановлено, що провали напруги, які фіксуються в мережі, не є наслідком комутації обладнання підприємства, тому зазначений захід не усуває першопричину проблеми. У зв’язку з цим перелік можливих технічних рішень потребує розширення.

Щодо застосування силової електроніки, слід зазначити, що на підприємстві вже використовуються регулятори швидкості обертання електродвигунів. Проте аналіз показує, що джерела провалів напруги не пов’язані з роботою внутрішніх електроприймачів підприємства, тому зазначений підхід не забезпечує вирішення проблеми якості електричної енергії в частині провалів напруги.

Організаційні та нормативні заходи

– Дотримання стандартів: Підтримка рівня напруги згідно з вимогами ДСТУ EN 50160.

– Моніторинг якості енергії: Постійний контроль параметрів електромережі для виявлення проблемних ділянок.

– Планування та координація: Ефективне планування робіт та взаємодія між операторами мережі та споживачами

За результатами огляду заходів сформульовано напрям зменшення впливу провалів напруги на електрообладнання підприємства теплопостачання.

Пріоритетним є застосування пристроїв для зменшення впливу провалів напруги. Далі розглянемо класифікацію та види сучасних пристроїв для компенсації провалів напруги.

2.3 Загальна класифікація приладів зменшення провалів напруг

Для мінімізації впливу провалів напруги використовують як апаратні (hardware) рішення — спеціалізовані компенсатори, так і алгоритми керування та оптимального розміщення пристроїв.

Наведемо основні технічні засоби протидії провалам напруги, які в науковій літературі розглядаються як ефективні для зменшення їх впливу або суттєвих коливань напруги:

Метод: Dynamic Voltage Restorer (DVR)

Опис і принцип дії приладів: Пристрої серійного підключення, які «вводять» (інжектують) необхідну напругу у момент провалу – забезпечують стабільну напругу на стороні навантаження, швидко реагують, захищають чутливе обладнання. [58, 59, 60]. Схема приладу представлена на рис. 2.3

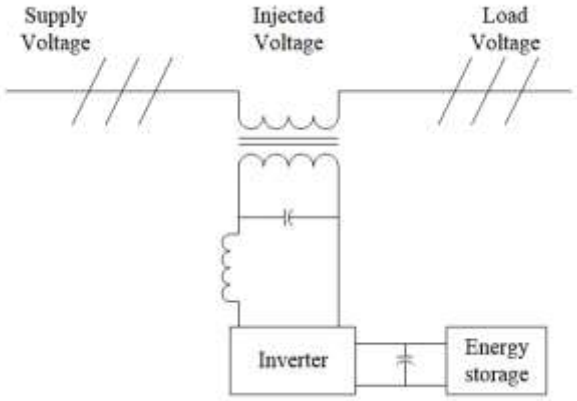


Рисунок 2.3 – Схема приладу із технологією dynamic voltage restorer

Рекомендації по використанню: Як окремий пристрій – DVR показав ефективне відновлення напруги при короткочасних провалах, навіть при захисті великих моторів чи при випадках коротких замикань.

Метод: Серійні активні фільтри / серійна компенсація (наприклад, серійний активний фільтр, автотрансформатор з PWM-світчем)

Опис і принцип дії приладів: Серійна компенсація напруги: під час провалу або перенапруги пристрій вставляє / коригує напругу, стабілізує її – альтернативний до DVR підхід [61].

Рекомендації по використанню: Наприклад, робота Mitigation of Voltage Sag and Swell using PWM Switched Autotransformer показує, що такий автотрансформатор може підтримувати нормативну напругу на навантаженні під час провалу або перевищення напруги.

Метод: Пристрої компенсації реактивної потужності (шунтові, як STATCOM / шунтові активні фільтри)

Опис і принцип дії приладів: Забезпечують швидке введення чи поглинання реактивної потужності, що допомагає підтримувати стабільне фазове напруження, стабілізацію мережі – важливо при нестабільних навантаженнях та нелінійних споживачах. Схема приладу представлена на рис. 2.4

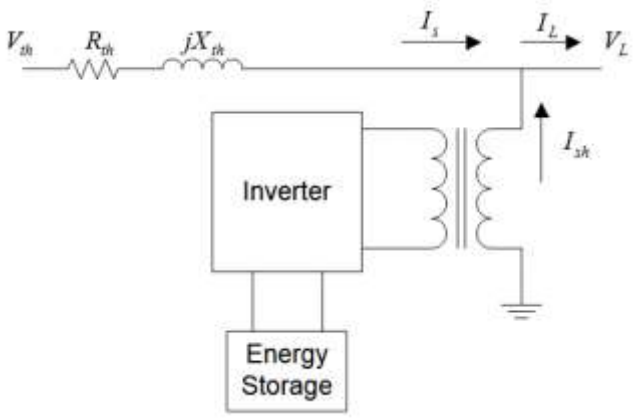


Рисунок 2.4 – Схема приладу із технологією STATCOM

Рекомендації по використанню: У роботах, що порівнюють варіанти (автотрансформатор, DVR, STATCOM), зазначено, що FACTS-пристрої – ефективні при помірних провалах, а автотрансформатор + серійна компенсація можуть бути економнішими та простішими.

Метод: Комбіновані підходи (FACTS-пристрої, активні + пасивні фільтри, адаптивні методи управління)

Опис і принцип дії приладів: Через зростання нелінійних навантажень, гармонік, змінних умов мережі, застосовують гнучкі системи з активною компенсацією + контролем, що дозволяють адаптуватися під умови і забезпечити стабільну якість [62, 63] Схема приладу комбінованого підходу наведена на рис. 2.5

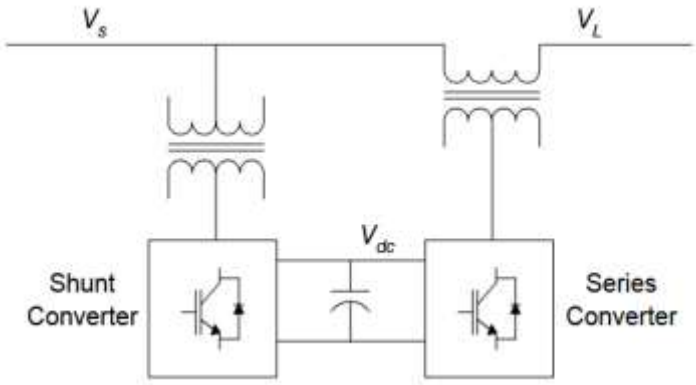


Рисунок 2.5 – Схема приладу із технологією комбінованого рішення

Рекомендації по використанню: Такий підхід дає найвищу надійність: дозволяє боротися не лише з провалами, а також з гармоніками, дисбалансом, перехідними процесами тощо.

Більшість наведених в літературі досліджень, демонструє реальну ефективність пристроїв компенсації (DVR, D-STATCOM) при різних типах провалів (фази, короткі замикання, важкі навантаження, PV-інтеграція тощо).

2.3.1 Dynamic Voltage Restorer (DVR)

DVR – серійно підключений перетворювач напруги (Voltage Source Inverter) із джерелом енергії (акумулятор, суперконденсатор, тиристорний накопичувач), який під час провалу інжектує додаткову напругу в розрив ланцюга, відновлюючи напругу на стороні навантаження до допустимого рівня. DVR вважається одним із найефективніших пристроїв саме для миттєвої компенсації провалів завдяки швидкій реакції і можливості коригувати як амплітуду, так і фазу інжектованої напруги. Основні обмеження: вартість, потреба в джерелі енергії та ефективність при сильно несиметричних провалах. [64, 65]

Огляд можливостей DVR у реальних мережах із розбором режимів моделювання в середовищі MATLAB наведено в [66].

Фундаментальний огляд топології DVR, їхніх переваг та недоліків наведено в [67].

Оптимальне розміщення DVR у мережі розглядається в роботі [68].

2.3.2 D-STATCOM / STATCOM (шунтова компенсація)

D-STATCOM – шунтовий перетворювач, що забезпечує швидке введення або поглинання реактивної потужності, тим самим регулюючи напругу в точці приєднання. На відміну від DVR, D-STATCOM не інжектує серійної напруги, а коригує струми; він ефективний для виправлення дисбалансу, коливань та покращення профілю напруги, хоча при глибоких провалах (особливо при значних асиметріях) може відставати від DVR у здатності повністю відновити напругу на навантаженні. Оптимальне розміщення та розмір D-STATCOM суттєво впливають на ефективність. [69]

Дослідниками було проведено порівняння ефективності пристроїв на двох різних технологіях: Dynamic Voltage Restorer (DVR) та D-STATCOM. Проводилися порівняння у боротьбі з провалами напруги для кількох різних типів несправностей [70]. Було зроблено висновок, що для різних випадків краще підходять різні технології або DVR, або D-STATCOM. [71]

Порівняння ефективності різних пристроїв DVR і D-STATCOM у системах з вітрогенерацією, де присутні провали напруги наведені в [72]

2.3.3 Серійні активні компенсатори та автотрансформатори з PWM

Існують реалізації серійної компенсації, які комбінують автотрансформатор з силовими ключами (PWM-перемикачами) або серійні активні фільтри. Такі рішення можуть бути дешевшими в деяких конфігураціях і дозволяють забезпечити часткову або повну компенсацію провалів при нижчих енергетичних потребах (порівняно із DVR з великими накопичувачами), але мають складнішу механіку й/або гірші динамічні характеристики в порівнянні з високошвидкісними DVR. [73]

2.3.4 Комбіновані методи компенсації провалів

Інтеграція фотоелектричних генераторів і батарей створює додаткові виклики (інтермитентність, двонаправлений потік потужності), що змінює

характеристики провалів і їх частотність. Деякі роботи показують, що DVR у поєднанні з батарейними накопичувачами або керованими перетворювачами PV-інверторів може значно зменшувати вплив провалів, особливо в низьковольтних мережах; проте потрібна узгоджена стратегія управління й оптимальне розміщення компенсаторів. [74, 75]

Через ускладнення структури навантажень (нерівномірні, нелінійні споживачі, велика частка ВДЕ) зростає інтерес до комбінованих систем: DVR або D-STATCOM у поєднанні з активними фільтрами, адаптивними алгоритмами управління (fuzzy logic, ANN, PSO-оптимізація, sliding-mode control) та системами оптимального розміщення реактивних пристроїв. Такі підходи дозволяють не лише відновити напругу під час провалу, а й зменшити побічні ефекти (гармоніки, дисбаланс) та підвищити загальну стійкість мережі. [76, 77]

Тому для підприємств на яких використовуються різні джерела живлення було розроблено практичні рекомендації по зниженню провалів напруги [64]. Для підприємств із великою кількістю чутливого обладнання (виробництва, дата-центри) оптимально використовувати DVR або комбінацію DVR + локальне акумулювання енергії.

Для покращення загального профілю напруги в розподільчій мережі (широкий вплив на декілька абонентів) доцільно застосовувати D-STATCOM/STATCOM із оптимальним розміщенням. [78].

В умовах інтегрованих PV-мереж потрібні гнучкі рішення, що поєднують перетворювачі генераторів, локальні накопичувачі й адаптивні алгоритми контролю. [79, 80]

2.4 Методи підвищення стійкості насосного обладнання до провалів напруги

На розглянутому підприємстві використовується специфічне електрообладнання, зокрема насосні агрегати з електричним приводом на базі асинхронних двигунів. Застосовуються, наприклад, насоси Atmos GIGA-I 50/85-1,5/2 та Atmos GIGA-N 100/160-30/2 та подібні до них насоси.

Для мінімізації негативного впливу провалів напруги саме на насосні агрегати науковцями рекомендується застосування таких технічних рішень. [14, 3, 11], що представлені на рис. 2.6:

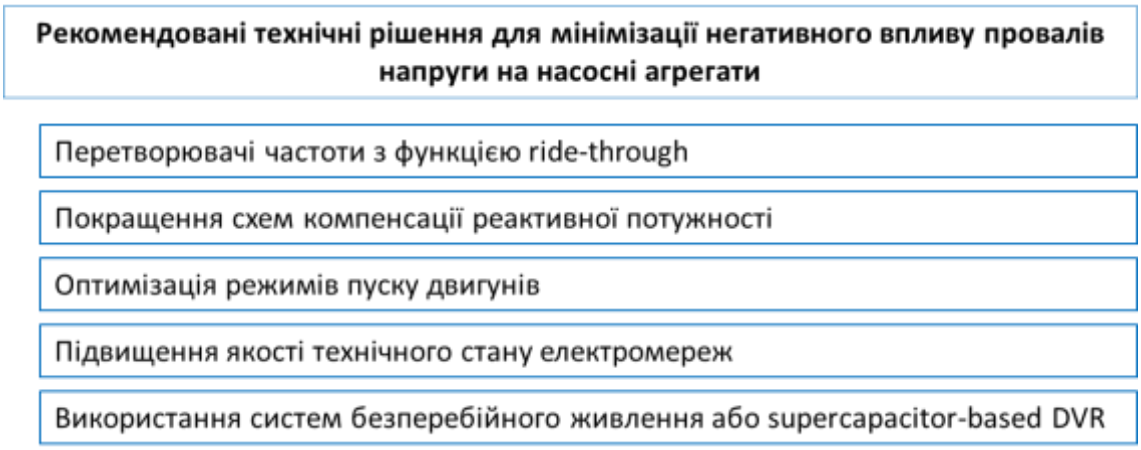


Рисунок 2.6 – Рекомендовані технічні рішення для мінімізації негативного впливу провалів напруги на насосні агрегати

Перетворювачі частоти з функцією ride-through. Забезпечують підтримання електромагнітного моменту при короткочасному зниженні напруги.

Покращення схем компенсації реактивної потужності. Дозволяє зменшити чутливість електричної мережі до пускових режимів.

Оптимізація режимів пуску електродвигунів. Передбачає використання пристроїв м’якого пуску та ступінчастий запуск груп насосних агрегатів.

Підвищення технічного стану електричних мереж. Включає заміну трансформаторів і кабельних ліній, а також впровадження секціонування мережі.

Використання систем безперебійного живлення або DVR на основі суперконденсаторів. Забезпечує компенсацію короткочасних провалів напруги.

У результаті аналізу наведених рекомендацій для мінімізації негативного впливу провалів напруги на підприємстві доцільним є застосування апаратних систем компенсації провалів напруги. Запропоновано використання приладу на технології DVR, наступний розділ присвячено обраному пристрою для зменшення впливу провалів напруг.

2.5 Запропонований до використання прилад компенсації провалів напруг SAGFiGHTER™ від компанії UST

SAGFiGHTER (або SagFighter™) – це пристрій для захисту від провалів напруги (voltage sags) у електромережах, розроблений компанією UST (United States Transformer). Він призначений для промислових застосувань, де короткочасні падіння напруги можуть спричинити зупинку обладнання.

SagFighter не є класичним FACTS-пристроєм (як STATCOM чи SVC), а спеціалізованим захисником від провалів напруги (voltage sags) для промислових навантажень.

SagFighter доступний у стандартних комплектаціях по потужності від 100 до 1500 кВА, що дозволяє підібрати модель під конкретне навантаження промислових споживачів.

Опис приладу. Прилад має два режими роботи: режим очікування та режим роботи. Між цими режимами здійснюється автоматичне перемикання. Завдяки використанню схеми швидкого перемикання прилад здатний реагувати на провали напруги в момент їх виникнення. Така швидкодія забезпечує захист навіть чутливого електрообладнання. Узагальнену схему приладу наведено на рисунку 2.7.

Прилад складається з послідовно з’єднаного комутаційного апарата перемикання та інвертора, підключеного паралельно до навантаження. Як накопичувач енергії використовуються електролітичні конденсатори, кількість циклів заряд–розряд яких становить десятки тисяч.

За даними виробника, строк служби такого приладу становить понад 25 років за нормальних умов навколишнього середовища (температура, вологість, атмосферний тиск, рівень запиленості, вібраційні навантаження тощо) [81].

Принцип роботи приладу.

Вхідна синусоїда (Supply рис. 2.7) постійно контролюється компаратором (клеми 1 і 2 на рис. 2.7) і якщо вона змінюється від номінальної величини, комутаційний перемикач (Static switch рис. 2.7) перемикається. Таким чином

інвертор (Bridge invertor рис. 2.7) від’єднується до мережі і підтримує навантаження (Load рис. 2.7)

Комутаційний перемикач (Static switch рис. 2.7) також виконує функцію фільтра і блокує повернення енергії назад до мережі енергопостачання (Supply рис. 2.7).

Напруга, яку створює інвертор (Bridge invertor рис. 2.7) синхронізована із напругою джерела живлення (Supply рис. 2.7). Але напруга, яку створює інвертор має прямокутну форму – меандр.

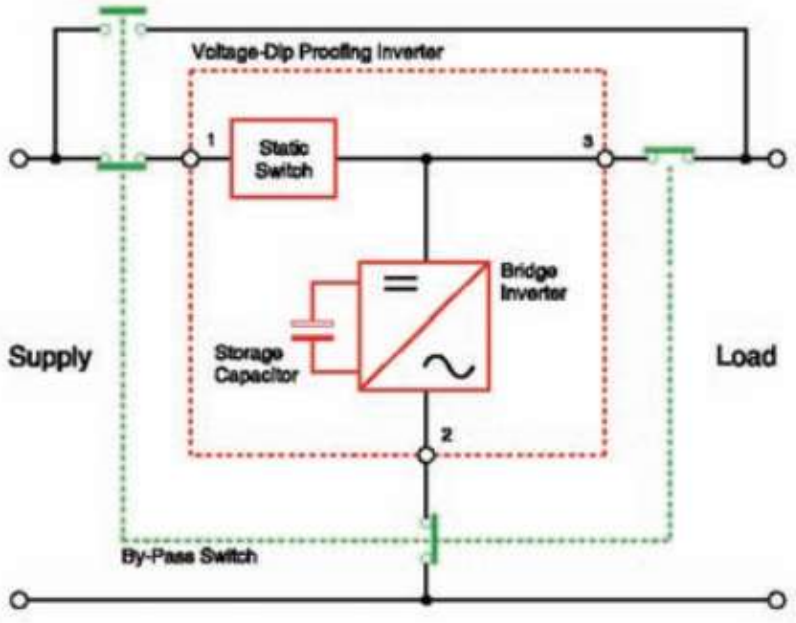


Рисунок 2.7 – Узагальнена схема приладу захисту від провалів напруги

Використання такої форми напруги має низку переваг:

– формування прямокутної форми напруги є простішим порівняно з формуванням гармонічної (синусоїдальної) форми. Відповідно, схемні рішення є простішими, а отже – більш надійними та дешевшими;

– діюче значення прямокутної форми напруги встановлюється таким самим, як і для гармонічної форми, за умови рівності амплітудних значень.

Таким чином, кількість енергії, що надходить до споживача, не змінюється під час компенсації провалу напруги.

Негативною стороною такої форми напруги є наявність гармонічних складових. Водночас інвертор працює протягом дуже короткого інтервалу часу, тому вплив згенерованих гармонік можна вважати незначним. У такому випадку шкода від гармонічних спотворень суттєво менша порівняно зі шкодою від провалу напруги.

Для забезпечення швидкого спрацювання постійно задіяним елементом електронної схеми приладу є комутаційний перемикач. Такий перемикач складається з діодного моста та біполярного транзистора з ізольованим затвором. Зазначені елементи мають параметри, що відповідають умовам важкого режиму роботи. На рисунку2.8 показано провал напруги, зумовлений коротким замиканням у мережі.

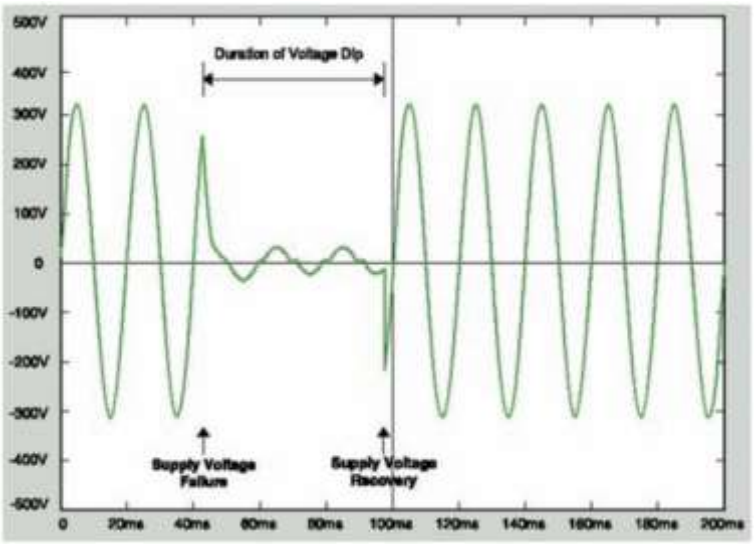


Рисунок 2.8 – Осцилограма падіння напруги в наслідок короткого замикання

Тривалість провалу напруги визначається часом, необхідним для спрацювання систем захисту та ліквідації короткого замикання (КЗ). Час спрацювання захисних апаратів є досить коротким (порядку 50 мс), що, як правило, недостатньо для повної зупинки електричних двигунів. Водночас

система керування двигунами реагує на провал напруги: контактори відключаються, реле розмикають кола керування.

На рисунку 2.9 показана точка відключення. Напруга знизилась до рівня нижче 65 % від номінального значення. Комутаційний перемикач вже відключився та підключив інвертор. Інвертор синхронізований з фазою мережі. На виході інвертора формується прямокутний імпульс напруги.

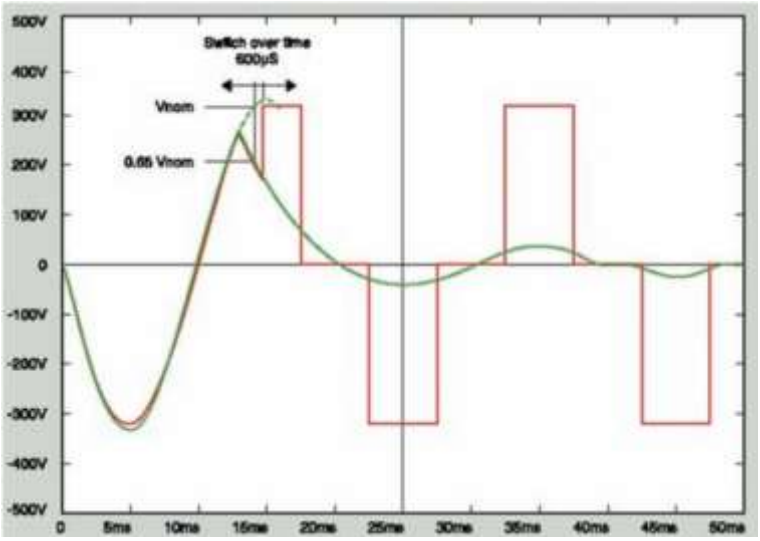


Рисунок 2.9 – Комутаційний перемикач відключився і ввімкнув інвертор

Коли напруга в мережі відновлюється, інвертор синхронізується з напругою мережі, після чого комутаційний перемикач підключає мережу. Конденсатори, які виконують функцію накопичення енергії для її подальшої видачі під час спрацювання приладу, відновлюють заряд приблизно за 1 с, іноді швидше – залежно від потужності навантаження та рівня розряду конденсаторів. Після цього прилад готовий до наступного спрацювання. У разі необхідності збільшення часу утримання напруги або забезпечення більшого навантаження передбачено можливість підключення додаткових конденсаторних модулів. Кожний пристрій розраховано на 100 годин роботи, за цей час пристрій може виправити більше ніж 10000 провалів. Пристрій має працювати в нормальних умовах оточуючого середовища, для яких, наприклад, температура оточуючого повітря не має перевищувати + 50°С.

Прилади вже були випробувані на різних підприємствах, що підтвердило їхню надійність у практичних умовах експлуатації. Середнє напрацювання до відмови становить 500 000 годин.

Опис переваг запропонованого приладу компенсації провалів напруги наведено нижче. SAGFiGHTER™ UST

1. Надійність. Середній час напрацювання на відмову у 2–3 рази вищий. Це досягається тим, що інвертор завжди знаходиться в режимі очікування, випромінюючи при цьому мало тепла. На виході інвертор має прямокутні імпульси, які замінюють звичайну синусоїду, але енергетично відповідають їй. Конструкція має високий рівень міцності.

2. Обслуговування. Накопичувач енергії зібрано на конденсаторах, що мають значно менші вимоги до обслуговування ніж акумуляторні батареї. Під час частих спрацювань знос акумуляторних батарей значно більший у порівнянні із рідкісною періодичністю спрацювань. В той же час конденсаторні батареї не мають такої залежності.

3. Пускові струми. Прилад витримує 10-20 кратні пускові струми.

4. Швидкість спрацьовування. Швидкодіюче спрацьовування зі швидкістю 200 мікросекунд запобігає відключенню контакторів, захищає чутливі реле, пускачі, контролери від провалів напруги. Більшість ДБЖ не мають такої високої швидкості спрацьовування.

5. Можливість роботи за низького коефіцієнта потужності. На відміну від звичайних ДБЖ, які спрацьовують при коефіцієнті потужності від 0,7 і вище, Запропонований прилад використовується в розподільних пристроях, де коефіцієнт потужності може бути в межах 0,15 до 0,4.

6. Розміри. Запропонований прилад потужністю 3 кВА має розміри 284x350x231 мм. Використання конденсаторів як накопичувач енергії не вимагає батарей, при цьому напруга постійного струму підтримується досить високою, що не вимагає трансформаторів.

7. Можливість інтеграції приладу до системи. Легко встановлюється в панель управління двигуна в 3-провідну систему.

8. Вибір часу спрацьовування. Запропоновані прилади мають регулятор часу спрацьовування від 0,1 до 3,1 с при змінному рівні напруги від 50% до 90% від номіналу.

9. Можливість роботи у жорстких умовах. Запропоновані прилади розроблено для роботи у жорстких умовах. Він виконаний у корпусі, який не потребує вентиляції чи вентилятора для охолодження.

Висновки по розділу 2

Універсального засобу для компенсації провалів напруг не існує. або комбінованими системами залежить від типу провалів (симетричні або асиметричні), масштабу проблеми (локальний навантажувач чи розподільча мережа), наявності відновлюваних джерел енергії та економічних обмежень. Актуальним трендом є застосування адаптивних алгоритмів керування та інтеграція рішень з елементами накопичення енергії [80]

Проаналізовано причини виникнення провалів напруги в електричній мережі.

Розглянуто заходи щодо зменшення впливу провалів напруги в електричній мережі, зокрема: технічні заходи на рівні електричної мережі, заходи на рівні споживача, а також організаційні та нормативні заходи.

Запропоновано рішення на рівні споживача – використання пристроїв для зменшення впливу провалів напруги.

Розглянуто загальну класифікацію пристроїв для компенсації провалів напруги.

Для подальшого використання обрано пристрій компенсації провалів напруги SAGFiGHTER™ UST. Описано його принцип роботи, а також наведено переваги та недоліки запропонованого рішення.

Спираючись на проведені дослідження та розглянуті технічні рішення, можна зробити висновок, що забезпечення захисту насосів від провалів напруги неможливе без комплексного підходу. Таким рішенням є підвищення якості електричної енергії в мережі підприємства.

РОЗДІЛ 3 МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ ЩОДО ЗМЕНШЕННЯ ПРОВАЛІВ НАПРУГ В МЕРЕЖАХ ТЕПЛОПОСТАЧАЛЬНИХ ПІДПРИЄМСТВ

3.1 Зменшення впливу провалів напруг за рахунок припинення надспоживання електричної енергії

Концептуальна ідея взаємозв'язку теплової та електричної енергії в населених пунктах та впливу їх поза нормованого споживання на виникнення провалів напруг в мережах була висунута в роботі [82].

Наднормативне споживання електричної енергії є наслідком того, що споживачі вмикають електроприлади сумарною потужністю, що перевищує розрахункову проектну потужність приєднання. Розглянемо наслідки цього явища з точки зору електропостачання. Проблема є характерною для міст із багатоквартирними будинками та єдиною системою централізованого теплопостачання.

Електричні мережі міст проектуються відповідно до вимог нормативних документів [83] і детально розглядаються в наукових працях різних авторів [84, 85, 86, 87]. Розробка мережі ведеться здійснюється за ієрархічним принципом – від нижчих до вищих рівнів системи: від окремого споживача до групи споживачів (будинку), далі до групи будинків і споруд (електричний район), потім до сукупності електричних районів (підстанції) і, зрештою, до системоутворювальної мережі [85]. Коефіцієнти потужності для квартир з електроплитами, для квартир з плитами на газі визначені в [88, 89].

Тому наприклад, питоме навантаження квартири для будинку: 9 поверхів, 9 під'їздів, 324 квартири, 9 ліфтів, газові плити, становитиме: $p_{кв.пит.}$ = 1,24, кВт/квартира.

При задіянні підігріву приміщень за рахунок електротеплонагрівачів, потужністю кожного 1,5 кВт. І якщо навіть не всі мешканці оберуть такий спосіб підігріву, а наприклад, тільки половина. Враховуючи, що коефіцієнт завантаження силових трансформаторів $К_з$= [0,5 – 0,7] - для електроприймачів 2 категорії надійності. То така додана потужність призведе до завантаження

трансформатора більше ніж потужність довготривалого навантаження. В результаті перенавантаження отримуємо і падіння напруги і провали напруги при підключенні обладнання.

3.1.1 Зв’язок між надспоживанням електричної енергії і обсягами теплової енергії у споживача

Як зазначено у [82], На основі моніторингу споживчого попиту на паливно-енергетичні ресурси можливе здійснення більш ефективної диспетчеризації великих джерел теплової енергії, що забезпечує підвищення спостережуваності та керованості системи теплопостачання. У [82] було визначено зв'язок між обсягами споживання електричної енергії і якості теплопостачання на статистичних даних енергоспоживання житловими масивами.

Як зазначено у [82]: "В силу огромной степени электрификации жизни общества ни одна из граней его деятельности не может не отразиться на характере потребления электроэнергии". Низька якість теплопостачання призводить до використання побутовими споживачами додаткових електричних та газових систем опалення для забезпечення необхідної температури в приміщеннях. Таким чином, незадоволений попит на теплову енергію зумовлює додаткове навантаження на системи електро- та газопостачання.

Для вдосконалення управління енергоспоживанням у муніципальному господарстві в [82] були проведені дослідження сезонних закономірностей взаємопов’язаного споживання електричної енергії, газу та теплової енергії у комунально-побутовому секторі. При цьому враховувалися дефіцит тепла та дефіцит природного освітлення у житлових приміщеннях. За результатами досліджень із загального масиву даних електроспоживання для конкретного житлового масиву виділяється складова, пов’язана з використанням електрообігріву. В [82] зроблено припущення, що якісній роботі системи центрального теплопостачання відповідає певна норма споживання електричної енергії житловими масивами. За норму приймається умова, за якої електрична

енергія не використовується споживачами для додаткового підігріву приміщень. Після введення такого підходу до оцінювання споживання електричної енергії з’являється можливість визначати поточне надспоживання як різницю між фактичним рівнем споживання та рівнем, що відповідає умовам якісного теплопостачання. У процесі моніторингу виявлення надспоживання може інтерпретуватися як сигнал для систем централізованого теплопостачання щодо необхідності коригування режимів відпуску теплоти, а величина надспоживання – як кількісна характеристика незадоволеності споживачів якістю теплопостачання.

3.1.2 Типи регулювання відпуску тепла споживачам

Відповідно до [90, 91] існують три основні методи автоматичного регулювання відпустки тепла на опалення для споживачів:

– по збуренню: цей метод враховує зміни зовнішньої температури повітря, швидкості вітру та ін.;

– за відхиленням регульованого параметра: цей метод враховує температурою повітря всередині приміщень, використання цього методу обмежено індивідуальним регулюванням у споживача;

– комбінований метод: цей метод використовує регулювання як за відхиленням так і за збуренням

Фахівцями комбінований метод регулювання вважається найбільш ефективним. Однак технічні можливості обладнання ТЕЦ не дозволяють його повноцінно реалізувати. На ТЕЦ відсутні датчики вимірювання температури в приміщеннях споживачів, тому такий підхід може розглядатися лише як теоретичний. Встановлення кількості датчиків, що перевищує кількість абонентів у декілька разів, є нереалістичним.

За умов неможливості реалізації технічного рішення ефективне регулювання може бути забезпечене за рахунок використання інформаційного підходу, тобто обробки даних статистичними методами. Розширення можливостей статистичного аналізу можливе шляхом залучення додаткових

джерел інформації. Теплопостачальні компанії встановлюють, що при погіршенні якості теплопостачання зростає споживання електричної енергії споживачами. Це зростання електроспоживання зумовлене використанням електроенергії для додаткового обігріву приміщень.

Метод моніторингу на основі зв'язкового споживання енергоресурсів побутовими споживачами пропонував в своїх роботах Вороновський Г.К. [82]. Де пропонувалося використовувати сумісний моніторинг споживання теплової та електричної енергії побутовими споживачами для визначення величини «електрообігріву» та впровадження відповідного регулювання в систему централізованого теплопостачання. Різними науковцями розглядалася система моніторингу запропонована Вороновським Г.К. і зазначалися її недоліки. Тому було запропоновано інший підхід до пов’язаного енергоспоживання. Який полягає у використанні математичних методів розкладання даних по потоках електричної і теплової енергії на складові. Складові будуть пояснені різними режимами споживання. Таким чином можна відокремити режими споживання електричної енергії, що спричинені нестачею теплової енергії. Що відрізняється від методу Вороновського, де розглядався еталон електроспоживання. Такий недолік методу Вороновського було окреслено в роботі [92] де зазначено, що модель побудована на еталоні електроспоживання [82] не враховує зміни в енергетичних характеристиках нових приладів побутових споживачів. Населення використовує бойлери, праски, мікрохвильові печі, кондиціонери, які мають значну потужність і, відповідно, змінюють графік споживання електричної енергії, роблячи його більш нерівномірним із різкими піками споживання та паузами між ними. У таких умовах визначення недопостачання теплової енергії шляхом фіксації зростання споживання електричної енергії є складною задачею. Запропонований підхід використання математичного методу для обробки даних сумісного моніторингу споживання теплової та електричної енергії не має такого недоліку.

Для реалізації методу обробки сумісних даних різних видів енергії потребує впровадження приладів і систем моніторингу для отримання потокових

даних. Впровадження електронних приладів обліку електричної та теплової енергії дозволяє отримувати потокові дані про обсяги споживання та додаткові параметри, зокрема показники якості електричної енергії. Це забезпечує формування необхідного обсягу інформації для подальшої обробки. У результаті з'являється можливість застосування математичних методів для аналізу потокових даних, виявлення характерних параметрів процесу та їх відхилень.

3.1.3 Моніторинг якості теплопостачання

Якість теплопостачання є тим фактором на який спираються споживачі в своїй оцінці теплової комфортності. Звичайно, що кількість поставленої енергії тепловою мережею визначається із розрахунків і зафіксована у відповідних нормативах, де фігурують температура зовнішнього повітря, тип огороджуючої конструкції будівлі, теплова система, параметри мікроклімату у приміщеннях, наявність кондиціонування повітря, призначення приміщення, максимальна швидкість повітря в приміщенні, тип схеми приєднання до системи теплопостачання, тип теплового режиму приміщень будівлі і інші параметри [93].

Система теплопостачання в Україні має низку негативних факторів, що перешкоджають виконувати точне регулювання. Так трубопровідна система доставки теплоносія до споживачів (будинків) в крупних містах має значний знос, а в силу кліматичних умов всі крупні міста України мають розгалужену тепломережу. Тепломережі міста Харкова складають понад 1600 км, довжина тепломережі міста Києва становлять 2700 км. В то же час найбільша в Європі довжина тепломереж у Варшаві (Польща) становить понад 1700 км. [94]

Треба взяти до уваги і режими роботи теплопостачаючих підприємств Європи і України. Середня температура повітря в Україні нижча.

За умов більш холодного клімату протяжність теплових мереж, як правило, є більшою. Знос систем теплопостачання в Україні є значним, що проявляється у поривах трубопроводів і витоках теплоносія.

Негативним фактором, що перешкоджає забезпеченню належного температурного режиму в приміщеннях, є відсутність паспортизації систем теплонагрівання, які до того ж не проходять належного профілактичного обслуговування.

Ще одним негативним фактором є неправильне регулювання під'єднання до теплової мережі та інші порушення режимів приєднання.

Усе це призводить до того, що забезпечення належних теплових умов для мешканців не завжди є можливим навіть за ідеальних умов транспортування теплоносія до будівель. Тому отримання зворотного зв'язку лише за температурою зворотного теплоносія є недостатнім.

Водночас системи моніторингу підприємств теплопостачання поступово розвиваються: застосовуються додаткові датчики температури, використовуються спеціалізовані програмні комплекси із залученням математичних методів обробки статистичних даних для оперативного виявлення аварійних і передаварійних режимів. Однак, незважаючи на це, існує потреба у формуванні додаткового каналу зворотного зв'язку. Зокрема, у роботах Вороновського Г.К. (2002 р.) розглядалася концепція автоматизації обліку та управління побутовим енергоспоживанням, у межах якої передбачалося використання апаратно-програмного комплексу для моніторингу якості теплопостачання житлових масивів [82]. Проблема енергозбереження зумовлює необхідність підвищення ефективності управління енергоспоживанням у теплових мережах міста. З цією метою проводилися дослідження сезонних закономірностей взаємопов'язаного споживання електричної енергії, газу та тепла у комунально-побутовому секторі [82]. За результатами досліджень із загального потоку даних про електроспоживання для конкретного житлового масиву було виділено складову, пов'язану з додатковим електричним підігрівом. Вороновський Г.К. висловив припущення, що ефективній роботі системи централізованого теплопостачання відповідає певний нормативний рівень споживання електричної енергії житловими масивами [82].

3.1.4 Моніторинг пов’язаних енергій теплової і електричної

Система постачання тепла побудована на «стратегії регулювання із постійною подачею теплоти (а отже, постійним тиском у всій мережі) протягом усього опалювального періоду, та температурою теплоносія, що змінюється залежно від температури зовнішнього повітря (система керована виробництвом). Стаціонарне регулююче обладнання в будівлях базується на постійній подачі теплоти та постійному тиску для належного функціонування» [95].

Таким чином для визначення необхідної температури теплоносія, за основу береться температура навколишнього середовища. Кількість енергії, необхідної для підігріву будівель і споруд, визначається за [96] а також документи [97 - 99]

Реальна схема фрагменту теплової системи одного із житлових масивів міста, представлена на рисунку 3.1. На схемі добре видно, що зворотної системи контроля теплового клімату в будівлях непередбачено. Передбачено систему контроля тиску теплоносія (P/M) і контролю його температури (t/M). Але такий контроль виконується тільки на трубопроводах мережі. Контролю температури в будівлях а тим більше в приміщеннях споживача не ведеться.

Теплонагрівальні прилади в приміщеннях споживачів були облаштовані у відповідності до розрахунків теплопровідності огороджуючих конструкцій будівель, витрат повітря на вентиляцію і інших параметрів. Всі ці параметри було розраховано на стадії проектування будівель, або проведення реконструкції будівель. В приміщеннях споживачів не ведеться поточний контроль стану теплонагрівальних приладів. Теплорегуляторів на теплонагрівальних приладах в приміщеннях споживачів не встановлено. Таким чином виникає ситуація, коли теплопостачаюче підприємство задає теплову «базу», а режим точного регулювання для підлаштування теплового комфорту у споживача не може бути забезпечений. Тому споживачі і виконують додаткове регулювання за рахунок наявної енергії, а найбільш доступний вид такої енергії – електрична енергія. Це створює підґрунтя «залежності» одного типу енергії від іншого. Таку залежність відмічають електроенергетичні компанії кожного опалювального сезону. І при

порівнянні даних відпущеної теплової енергії і спожитої електричної енергії спостерігається залежність. Така залежність була описана автором в роботі [100].

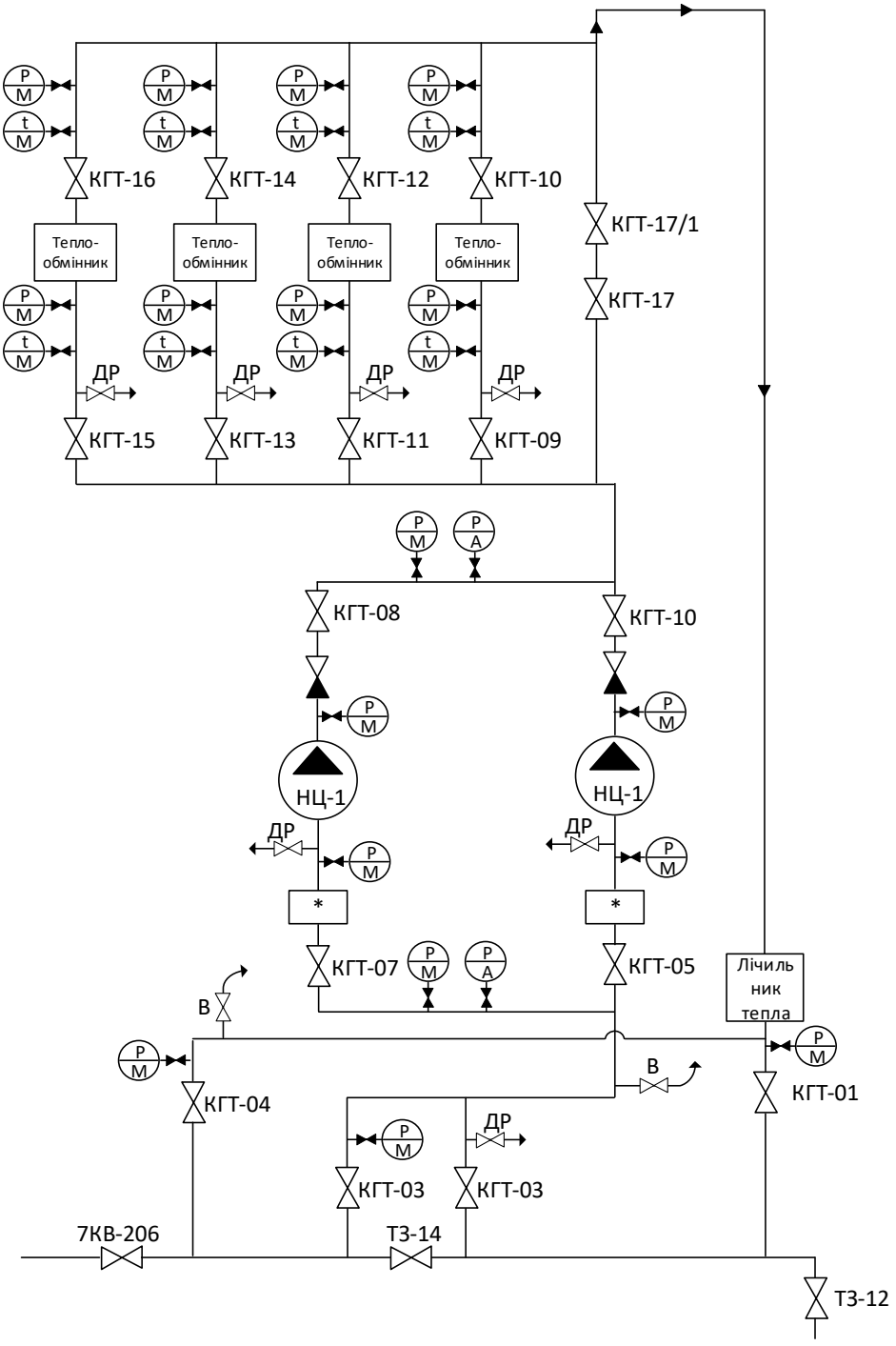


Рисунок 3.1 – Технологічна схема КГУ контур теплоносія

Сумісно із Лука О.В. було запропоновано підхід взаємної замінності різних типів енергій. Ідея полягала в тому, щоб розглядати всю сукупність енергій, яку споживає споживач у вигляді одного загальноенергетичного споживання [100]. Концепція взаємопов'язаності енергій пояснює умови за якими контроль споживання одного типу енергії дозволяє проводити контроль за іншим видом енергії.

Автором даної роботи розглядається перетворення інформації, що неявно міститься в добових профілях електроспоживання в інформацію про якість теплопостачання, оскільки недоотримане тепло споживачі можуть компенсувати електрообігрівом. У такому разі виявлення провалів напруги буде сигналом про виникнення розладки в рядах електро-теплопостачання, і свідчить про недостаню кількість теплової енергії.

Для виконання умови застосування статистичних методів обробки даних теплової і електричної енергій необхідно побудувати систему моніторингу для двох видів енергії одночасно.

Сучасні системи моніторингу теплової енергії включають внутрішньосистемні параметри, зокрема температуру та тиск теплоносія. Однак для реалізації запропонованого умови моніторингу двох енергій, що передбачає також відстеження електричних параметрів, систему моніторингу необхідно дооснастити відповідними засобами вимірювання та збору даних.

Визначимо вимоги до системи моніторингу для двох видів енергії в цілому. По-перше, для будь-якого технологічного процесу актуальною є вимога своєчасного виявлення відхилень у його перебігу або збоїв у роботі обладнання. Виявлення має здійснюватися у допустимий термін після виникнення події та забезпечувати необхідну чутливість.

По-друге, процедури виявлення мають бути формалізовані у вигляді логічних функцій або алгоритмів, що забезпечують ідентифікацію проблеми та мінімізацію хибних спрацювань.

По-третє, результати виявлення повинні бути достатньо інформативними для встановлення причин відхилень.

З огляду на невизначеність часу та місця виникнення відхилень система моніторингу має функціонувати безперервно протягом усього часу роботи технологічного процесу.

Оскільки всі дані від датчиків і систем спостереження надходять у часовій формі, доцільно розглядати їх як часові ряди. Крім того, математичний апарат обробки часових рядів є достатньо розвиненим і придатним для аналізу таких даних.

Таким чином, мета моніторингу динамічних процесів полягає у виявленні відхилень параметрів від їх нормативних значень з подальшим формуванням заходів щодо запобігання негативним наслідкам. Виявлення відхилень здійснюється на основі аналізу часових рядів, що містять показники параметрів технологічного процесу.

Отже, пропонується впровадження не лише змін у технічній складовій системи моніторингу (зокрема, доповнення її електричними параметрами), але й застосування математичних методів обробки, яка дозволяє:

– виявляти наявність аварійних процесів;

– оцінювати їх інтенсивність;

– визначати періодичність їх виникнення;

– ідентифікувати причини відхилень;

– прогнозувати можливість їх появи.

Основна ідея моніторингу полягає у контролі параметрів процесу та визначенні причин виникнення збоїв. На основі результатів моніторингу формуються керуючі впливи з метою запобігання збоям або відхиленням, а також мінімізації їхніх наслідків для технологічного процесу.

Питання моніторингу та оптимального управління процесами на основі аналізу часових рядів досліджувалися багатьма науковцями; результати цих досліджень відображено у відповідних наукових публікаціях [101 – 104].

Виділимо основні завдання моніторингу динамічних процесів за допомогою математичного аналізу часових рядів [102, 103]:

– ідентифікація прихованих (латентних) компонент часового ряду з метою встановлення причинно-наслідкових зв’язків у динамічній системі, що його формує;

– визначення моментів зміни властивостей досліджуваного часового ряду;

– фіксація часових інтервалів виходу значень параметрів процесу за межі заданої області;

– оптимізація режимів функціонування аналізованої системи та забезпечення контролю якості кінцевого продукту.

3.2 Математичні методи для вирішення задач моніторингу технічних систем

3.2.1 Використання аналізу часових рядів для виявлення властивостей технічної системи

Параметри роботи технічних систем постійно змінюються в часі і вони можуть вимірюватися як потік даних. Такий потік даних на мові математики можна описати терміном – часовий ряд. Чим складніша технічна структура, тим більше параметрів потрібно контролювати для розуміння процесів. Аналіз потокових даних технічної структури дозволяє зрозуміти походження того чи іншого стану технічної структури, а це в свою чергу дозволяє створити стратегії управління для досягнення, наприклад, оптимальності або економічності.

Цього можна досягти використовуючи аналіз часових рядів. В математиці аналіз часових рядів широко досліджений напрям, так в роботах Бокс Дж., Дженкинс Г. [105], Бриллинджер Д. [106], Кендалл М. Дж., Стюарт А. [107], Димова Г.О. [108], Отнес Р., Эноксон Л. [109], Хеннан Э. представлені різні методи аналізу часових рядів.

Використання обробки часових рядів, що отримані від технічних приладів і різних виробничих процесів дозволяє віднайти відомості про різні тонкі моменти зміни параметрів технологічних процесів і навіть відокремити різні неявні або приховані властивості для таких процесів.

Відповідно, основна мета проведення аналізу часового ряду за визначенням дослідників є ідентифікація динамічних властивостей об'єктів, що їх породжують [108].

Загалом виділяють два класи задач аналізу часових рядів для динамічних процесів [108]:

– задачі ідентифікації об'єкта, що породжує ряд (мета якої підбір такої математичної моделі, що буде генерувати адекватний часовий ряд)

– задачі фільтрації часових рядів (мета якої полягає у виділенні та вивченні деякого компонента ряду)

Аналізу часових рядів присвячені роботи Кендалл М.Дж. і Стюарт А. [107], де зазначено, що кінцевою метою аналізу часових рядів 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.

Для реальних динамічних процесів залучення аналізу часових рядів не завжди можливе. В реальних технічних системах динамічні процеси дуже складні і мають десятки взаємопов’язаних параметрів, а відповідно структура часових рядів складна. Тому визначити вплив окремого чинника, яких може бути десятки, дуже важко. Тим не менш, використання аналізу часових рядів має свої безперечні переваги.

3.2.2 Діагностика збоїв та відмов при аналізі часового ряду

Підчас проведення аналізу часового ряду є можливість визначити різкі зміни властивостей часового ряду. Одне із завдань аналізу часового ряду є визначення «розладки». Такий аналіз відповідає завданням і вимогам моніторингу технічних систем. Тому використання математичного аналізу часових рядів є придатним методом для проведення моніторингу.

Процес виявлення відхилень у різних процесах при аналізі часових рядів розкрито в літературі [110 - 114].

Конкретно рішенню "завдань про розладнання" свої роботи присвятив Ширяев О.М. [113]. Завданням вирішення «розладок» також приділив увагу Нікіфоров І.В. [112]. Нікіфоров І.В. і Ширяев О.М. дали визначення терміну – розладка випадкових послідовностей є зміна будь-яких їх імовірнісних характеристик.

Автори виділяють два класи "завдань про розладнання" [112, 113].

Перший клас отримав назву «Завдання про якнайшвидше виявлення розладнання». Для такого класу завдань постановка задачі звучить так: «нехай послідовно в часі надходить інформація про випадковий процес, у певний момент часу відбувається зміна будь-якої ймовірнісної характеристики процесу». Завдання: якнайшвидше виявити зміну. Потрібно обмежити помилкові сигнали тривоги деякою величиною. Таке вирішення завдання не потребує зазначення точного моменту часу, коли відбулася «розладнання».

Другий клас отримав назву «Апостеріорне завдання про розладнання». Для такого класу завдань постановка задачі звучить так: «нехай пред'явлено реалізацію випадкового процесу. За умови що вибірка не є статистично однорідною. У певний момент часу відбувається зміна будь-якої ймовірнісної характеристики процесу». Завдання: виявити моментів часу зміни ймовірнісних характеристик і розбити вихідну вибірку на кілька статистично однорідних фрагментів. Така постановка завдання потребує як найточніше оцінити момент виникнення «розладнання».

Із літератури [112, 113] формальна постановка задачі виявлення «розладнання» буде описана в такому вигляді: нехай дана випадкова послідовність $x_1, x_2, \ldots, x_N$, 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 $x_1, x_2, \ldots, x_N$, виявляти момент «розладнання» t_0.

Таким чином пошук збоїв та відмов на пов’язаних даних теплової і електричної енергії розглядається як розв'язання задач про «розладнання»

часових рядів, для рішення яких необхідно сформулювати критерії. Такі критерії були розроблені і зазначені в літературі [112]. Наведемо ці 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 збурювань.

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 відбулася.

3.3 Розробка методу виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов'язаних потоках теплової та електричної енергії

3.3.1 Опис сингулярно-спектрального аналізу

Формально метод сингулярно-спектрального аналізу [115 – 118] можна уявити у вигляді двох частин:

1 Розкладання;

2 Відновлення.

Розкладання включає етап вкладення (формування траєкторної матриці) і сингулярне розкладання (формування власних трійок і розкладання траєкторної матриці на суму елементарних матриць).

Відновлення включає групування (групування власних трійок, поділ адитивних компонентів ряду) і діагональне усереднення (формальна процедура перетворення матриць у часовий ряд).

Алгоритм методу SSA, описаний авторами [115 – 118] виглядає наступним чином:

Є часовий ряд $\boldsymbol{X_N = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}}$ довжини $\boldsymbol{N}$, $(\boldsymbol{N > 2})$.

Першим йде етап Вкладення, тобто формування траєкторної матриці. Основним кроком тут є вибір цілого числа $\boldsymbol{L}$ – довжини вікна, $\boldsymbol{2 \le L \le N - 1.}$ При виборі параметра $\boldsymbol{L}$ доцільно враховувати наступне, якщо довжина вікна буде обрана досить великою, всі вектори траєкторної матриці будуть містити істотну частину інформації про поведінку вихідного часового ряду.

Оскільки траєкторна матриця має властивість симетрії, і сингулярні розкладання траєкторних матриць з довжиною вікна L та довжиною вікна $\boldsymbol{N - L + 1}$ еквівалентні, то вибір величини $\boldsymbol{L}$, що перевищує половину довжини часового ряду, не має сенсу. Таким чином, для формування траєкторної матриці доцільно вибрати довжину вікна приблизно рівну половині довжини ряду: $\boldsymbol{L \approx \frac{N}{2}.}$ У випадку, якщо часовий ряд має періодичну компоненту з деяким періодом, рекомендується вибрати довжину вікна пропорційну величині цього періоду.

Враховуючи наведені вище рекомендації щодо вибору параметра при дослідженні структури часового ряду, доцільно використовувати кілька варіантів довжини вікна.

Після вибору параметра $\boldsymbol{L}$, значеннями вихідного часового ряду послідовно заповнюються стовпці траєкторної матриці $\boldsymbol{X^*}$. При цьому перший стовпець містить елементи ряду від $\boldsymbol{x_0}$ до $\boldsymbol{x_{L-1}}$, другий – від $\boldsymbol{x_1}$ до $\boldsymbol{x_L}$ і так далі, поки ряд не буде вичерпаний.

Отже, перший етап полягає у формуванні з часового ряду $\boldsymbol{X_N}$ траєкторної матриці $\boldsymbol{X^*(L \times M)}$, де $\boldsymbol{M = N - L + 1}$, шляхом послідовного вибору з ряду $\boldsymbol{X_N}$ відрізків довжини $\boldsymbol{L}$, тобто перетворення вихідного одновимірного ряду на послідовність $\boldsymbol{L}$ – мірних векторів, кількість яких дорівнює $\boldsymbol{M}$, де $\boldsymbol{X_j^* = \left(x_{j-1}, \dots, x_{j+L-2}\right)^T}$, $\boldsymbol{1 \le j \le M}$. Матриця $\boldsymbol{X^*}$ має вигляд:

$$X^* = \begin{pmatrix} x_0 & x_1 & x_2 & \cdots & x_{M-1} \\ x_1 & x_2 & x_3 & \cdots & x_M \\ x_2 & x_3 & x_4 & \cdots & x_{M+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{L-1} & x_L & x_{L+1} & \cdots & x_{L+M-2} \end{pmatrix} \quad (3.1)$$

Далі йде етап сингулярного розкладання. Сингулярне розкладання матриці X^* проводиться за наступною схемою:

Обчислюється матриця $\boldsymbol{R = X^* X^{*T}}$. Знаходяться власні числа $\boldsymbol{\lambda_1, \ldots, \lambda_L}$ матриці $\boldsymbol{R}$. Всі власні числа розташовані в порядку, що не зростає: $\boldsymbol{(\lambda_1 \geq \cdots \geq \lambda_L \geq 0)}$. Знаходяться власні вектори $\boldsymbol{U_1, \ldots, U_L}$ матриці $\boldsymbol{R(L \times L)}$, відповідні цим власним числам, $\{\boldsymbol{U_1, \ldots, U_L}\}$ – система ортонормованих власних векторів матриці $\boldsymbol{R}$, вектори $\boldsymbol{U_i}$ – ліві сингулярні вектори.

Далі обчислюються $\sqrt{\boldsymbol{\lambda_i}}$ – сингулярні числа і факторні вектори $\boldsymbol{V_i}$:

$$V_i = \frac{1}{\sqrt{\lambda_i}} X^{*T} U_i \, , \, i = 1, \ldots, d, \quad (3.2)$$

де $d = max\{i, \lambda_i > 0\}$;

V_i – факторні вектори (праві сингулярні вектори).

Обчислюється вектор $\boldsymbol{i}$-х головних компонент:

$$Z_i = \sqrt{\lambda_i} V_i = X^{*T} U_i, \, i = 1, \ldots, d. \quad (3.3)$$

В результаті вищевикладеного отримаємо сингулярне розкладання траєкторної матриці $\boldsymbol{X^*}$**:**

$$X^* = X^*{}_1 + \cdots + X^*{}_i + \ldots + X^*{}_d, \, i = 1, \ldots, d, \quad (3.4)$$

де $X^*{}_i = \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^T$,

$$X^{*} = \sum_{i=1}^{d} \sqrt{\lambda_i} U_i V_i^{T} \ . \qquad (3.5)$$

Для цього сингулярного розкладання набір $\sqrt{\boldsymbol{\lambda_i}}, \boldsymbol{U_i}, \boldsymbol{V_i}$ – це *i*-а власна трійка сингулярного розкладання; матриці $\boldsymbol{X_i^*}$.

Кожне власне число $\boldsymbol{\lambda_i}$ характеризує внесок матриці $\boldsymbol{X_i^*}$ у сингулярне розкладання.

Сингулярне розкладання можна інтерпретувати за аналогією з методом головних компонентів у статистиці, як розкладання всіх стовпців матриці $\boldsymbol{X}^*$ за базисом з їх основних векторів.

На наступному етапі сингулярно-спектрального аналізу проводиться групування компонентів розкладання.

Метою етапу групування є поділ часового ряду на адитивні компоненти.

Процедура групування дозволяє розділити всі множини індексів ($\boldsymbol{i} = \boldsymbol{1}, \ldots, \boldsymbol{d}$) на *m* непересічних підмножин: $\boldsymbol{I_1}, \ldots, \boldsymbol{I_m}$. Тобто проводиться процедура об'єднання індексів у групи, або поділ членів сингулярного розкладання на групи.

Кожній підмножині $\boldsymbol{I_j}$ відповідає результуюча матриця $\boldsymbol{X_{I_j}^*}$, що визначається як сума матриць, що входять до підмножини. Обчисливши результуючі матриці для кожного з $\boldsymbol{m}$ підмножин, можна уявити сингулярне розкладання матриці $\boldsymbol{X}^*$ у згрупованому вигляді, як суму результуючих матриць кожного підмножини:

$$X^{*} = X^{*}{}_{I_1} + X^{*}{}_{I_2} + \cdots + X^{*}{}_{I_m}. \qquad (3.6)$$

У методі SSA етап групування важко повністю формалізувати.

Ця процедура ґрунтується на аналізі власних чисел $\boldsymbol{\lambda_i}$, а також векторів $\boldsymbol{U_i}$ і $\boldsymbol{V_i}$ – лівих та правих сингулярних векторів у сингулярному розкладанні, і оскільки кожна матрична компонента сингулярного розкладання повністю визначається відповідною сингулярною трійкою $(\sqrt{\boldsymbol{\lambda_i}}, \boldsymbol{U_i}, \boldsymbol{V_i})$, мова йде про групування власних трійок. Аналізуючи форму сингулярних векторів однієї із власних трійок, можна передбачити поведінку відповідної компоненти ряду, відновленої за допомогою цієї трійки, оскільки відновлена компонента матиме схожу форму. Чим більше сингулярне число у власній трійці, тим більше внесок компоненти ряду, відновленої за цією власною трійкою.

Як зазначено авторами в [114], щоб витягти тренд з часового ряду, необхідно згрупувати всі власні трійки з сингулярними векторами, що повільно змінюються, причому якщо ряд має яскраво виражену тенденцію, то власні трійки, відповідні тренду, матимуть перші позиції у сингулярному розкладанні траєкторної матриці.

Якщо досліджуваний часовий ряд характеризується вираженою коливальною структурою, перші власні трійки, як правило, відповідають гармонічним складовим. При цьому кожна гармонічна компонента формує пару власних трійок із близькими значеннями сингулярних чисел [114].

Принцип групування для ідентифікації шуму може полягати у віднесенні до групи власних трійок, які не містять ні тренду, ні коливань. Корисною інформацією для виявлення шумових компонентів може служити також різкий стрибок у зменшенні власних чисел, у цьому випадку сигналу відповідають великі власні числа, а шуму малі.

Останнім етапом методу SSA є діагональне усереднення. На цьому етапі проводиться відновлення рядів $\boldsymbol{X_N^{(j)}}$ за згрупованими матрицями $\boldsymbol{X_{I_j}^*}$, тобто кожна матриця $\boldsymbol{X_{I_j}^*}$ переводиться в новий ряд довжини $\boldsymbol{N}$.

Оскільки передбачається, що кожна матриця $\boldsymbol{X_{I_j}^*}$ є траєкторною матрицею деякого часового ряду, побічні діагоналі таких матриць повинні складатися з однакових елементів. Однак на практиці так буває не часто. Виникає

необхідність застосування процедури, формально перетворюючої довільну матрицю $\boldsymbol{X}_{\boldsymbol{I}_j}^*$ ганкелеву, що містить однакові елементи на побічних діагоналях. Як таке перетворення використовується діагональне усереднення, за допомогою якого значення ряду $\boldsymbol{X}_{\boldsymbol{N}}^{(j)}$ задаються як середні значення елементів матриці $\boldsymbol{X}_{\boldsymbol{I}_j}^*$ вздовж відповідних побічних діагоналей.

Принцип діагонального усереднення викладено в [115], де зазначено що діагональне усереднення для довільної матриці X^* розмірністю $(\boldsymbol{L} \times \boldsymbol{M})$ (при $\boldsymbol{L} < \boldsymbol{M}$) виконується за формулою:

$$x_k = \begin{cases} \dfrac{1}{k+1} \sum\limits_{i=1}^{k+1} x_{i,k-i+2} & для\ \ 0 \le k \le L-1, \\ \dfrac{1}{L} \sum\limits_{i=1}^{L} x_{i,k-i+2} & для\ L-1 \le k \le M, \\ \dfrac{1}{N-k} \sum\limits_{i=k-M+2}^{N-M+1} x_{i,k-i+2} & для\ \ M \le k \le N. \end{cases} \tag{3.7}$$

де x_k – елементи ряда $X_N = (x_0, \dots, x_{N-1})$,

$N = L + K - 1$ – довжина ряду,

x_{ij} – елементи матриці X^*, $(j = k - i + 2)$.

Отже, діагональне усереднення перекладає матрицю $\boldsymbol{X}^*$ в ряд $\boldsymbol{X_N} = (\boldsymbol{x_0}, \dots, \boldsymbol{x_{N-1}})$ за формулою (3.7) .

В результаті застосування методу сингулярно-спектрального аналізу, вихідний ряд $\boldsymbol{X_N} = (\boldsymbol{x_0}, \dots, \boldsymbol{x_{N-1}})$ розкладається на суму $\boldsymbol{m}$ рядів $\boldsymbol{X}_{\boldsymbol{N}}^{(j)}$, тобто можна досягти розбиття часового ряду на адитивні складові.

Наступне питання, яке може виникнути при аналізі часових рядів, стосується інтерпретації відновлених компонентів і відноситься до предметної галузі дослідження, що проводиться.

Перевагами описаного методу є відсутність необхідності апріорного завдання моделі ряду, а також можливість роботи з модульованими гармоніками (на відміну від методів, що використовують перетворення Фур'є).

3.3.2 Порядок застосування сингулярного розкладання для виявлення та аналізу структурних змін часових рядів

Пропонується наступний порядок діагностики структурних змін часового ряду. Нехай досліджується, на появу структурних змін, часовий ряд $\boldsymbol{X_N} = \{\boldsymbol{x_0}, \dots, \boldsymbol{x_t}, \dots, \boldsymbol{x_{N-1}}\}$ фіксованої довжини **N, (N>2)**. Вибираємо довжину діапазону перегляду досліджуваного часового ряду – параметр **D, (D<N).** Вибір діапазону здійснюється на основі попереднього аналізу часового ряду або використання апріорної інформації про структурні складові ряду.

Спочатку межі діапазону перегляду встановлюються таким чином: $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{0}; \boldsymbol{D-1}]$. Після чого за алгоритмом методу сингулярно-спектрального аналізу проводиться сингулярне розкладання фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду, та аналізується отриманий в результаті розкладання набір власних трійок.

Далі проводиться поетапне зміщення діапазону перегляду з кроком один елемент часового ряду.

На кожному наступному етапі межі діапазону перегляду зміщуються праворуч на один елемент часового ряду наступним чином: спочатку $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{0}; \boldsymbol{D-1}]$, при першому зміщенні $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{1}; \boldsymbol{D}]$, при i-м зміщенні $\boldsymbol{t} \in [\boldsymbol{i}; \boldsymbol{D+i-1}]$ (рис. 3.2). На кожному етапі проводиться сингулярно-спектральний аналіз фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду.

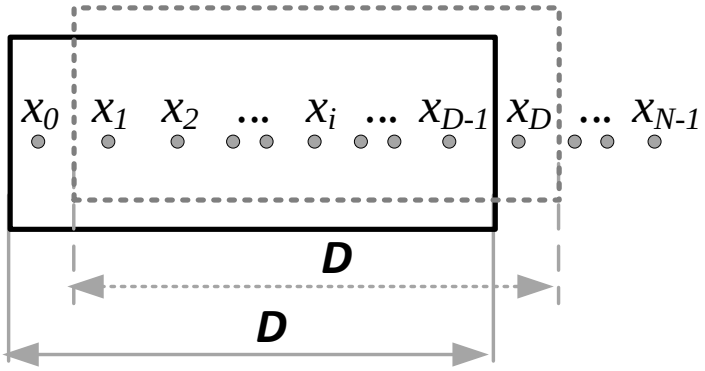


Рисунок 3.2 – Зміщення меж діапазону перегляду

Оскільки кожна власна трійка однозначно визначає компонент розкладання, то аналіз змін у структурі власних трійок сингулярного розкладання фрагмента ряду всередині діапазону перегляду при його зміщенні дає можливість виявити структурні зміни часового ряду. Поява нових власних трійок свідчить про те, що у часовому ряді з'явилися нові структурні складові. Слід враховувати, що кожна гармонічна компонента породжує дві власні трійки з близькими сингулярними числами, тому про появу нової гармонічної складової у структурі ряду свідчить нова пара власних трійок у сингулярно-спектральному розкладанні чергового фрагмента ряду всередині діапазону перегляду.

Зникнення власних трійок у сингулярно-спектральному розкладанні при зміщенні меж діапазону перегляду свідчить про те, що відповідні структурні компоненти більше не присутні у часовому ряді.

Збільшення або зменшення значень сингулярних чисел у власних трійках свідчить про зміну значущості відповідних компонент розкладання. Якщо йдеться про гармонічні структурні складові часового ряду, то зміна значень сингулярних чисел може свідчити про зміну амплітуди коливань (про посилення або зменшення впливу фактора, що зумовлює появу компоненти у структурі часового ряду).

Власні (сингулярні) трійки $(\sqrt{\boldsymbol{\lambda_i}}, \boldsymbol{U_i}, \boldsymbol{V_i})$ сингулярного розкладання при сингулярно-спектральному аналізі складаються з $\sqrt{\boldsymbol{\lambda_i}}$ – сингулярних чисел, $\boldsymbol{U_i}$ – лівих сингулярних векторів та $\boldsymbol{V_i}$ – факторних векторів (правих сингулярних

векторів), де $\boldsymbol{\lambda_i}$ – власні числа матриці $\boldsymbol{R = X^* X^{*T}}$. Тому замість аналізу сингулярних чисел можна аналізувати набір власних чисел коваріаційної матриці $\boldsymbol{R = X^* X^{*T}}$. Зміна спектра матриці R при черговому зміщенні діапазону перегляду дає підстави припускати, що в цей момент мають місце структурні зміни в часовому ряді $\boldsymbol{X_N = \{x_0, \dots, x_{N-1}\}}$.

Аналіз структурних змін часового ряду за запропонованим методом виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов'язаних потоках теплової та електричної енергії можна умовно поділити на три етапи:

1 Експрес-аналіз (аналізується лише динаміка значень власних чисел коваріаційної матриці під час руху діапазону перегляду).

2 Детальний аналіз (враховуються зміни у власних трійках під час руху діапазону перегляду).

3 Додатковий аналіз (аналізується ряд залишків після отримання певних значущих структурних складових часового ряду).

Експрес-аналіз дозволяє визначити момент виникнення структурних змін, але не показує характер цих змін. Для здійснення експрес-аналізу достатньо лише спостережень за змінами значень власних чисел коваріаційної матриці, отриманих при сингулярному розкладанні фрагмента часового ряду, що потрапив усередину діапазону перегляду, при зміщенні меж діапазону перегляду. При цьому не важливо, якій компоненті відповідають які власні числа $\boldsymbol{\lambda_i}$ і, відповідно, власні трійки $\sqrt{\boldsymbol{\lambda_i}}, \boldsymbol{U_i}, \boldsymbol{V_i}$.

Під час експрес-аналізу, як правило, фіксується поява «розладкової» компоненти. Вона виникає в той момент, коли точка структурної «розладки» потрапляє в діапазон перегляду; після її виходу з цього діапазону відповідна компонента зникає.

Наявність такої компоненти свідчить про включення в аналізований інтервал моменту виникнення структурної зміни часового ряду. «Розладковій» компоненті відповідає група власних трійок, для яких характерні значення

сингулярних чисел, істотно менші порівняно з основними структурними компонентами ряду.

Для більш детального аналізу крім аналізу динаміки значень власних чисел коваріаційної матриці необхідно проведення аналізу змін у власних трійках $(\sqrt{\lambda_i}, U_i, V_i)$. Оскільки за характером поведінки власної (U_i) та факторного (V_i) векторів у відповідних власних трійках можна визначити характер поведінки структурної компоненти ряду, відновленої за цією власною трійкою. Після чого можна визначити за який структурний компонент ряду відповідає яка група власних трійок (і власних чисел) і відповідно судити про характер структурних змін і про рівень значущості кожної компоненти в новій структурі часового ряду.

Для здійснення додаткового аналізу (і уточнення діагностики) проводиться аналіз низки залишків після отримання деяких значущих структурних складових часового ряду. Аналіз низки залишків дозволяє отримати додаткову інформацію про момент структурної «розладки».

Такий аналіз ефективний при структурних змінах, пов'язаних з появою або зникненням структурних складових часового ряду, але при зміні амплітуди гармонік, що входять до складу ряду, аналіз залишків не дає результатів.

Треба зауважити, що довжина діапазону перегляду D є основним параметром описаної методики. Від правильності вибору довжини діапазону перегляду залежить точність ідентифікації структурних змін у часовому ряді. При виборі цього параметра необхідно враховувати всю наявну додаткову інформацію про ряд даних.

Якщо на формування ряду впливають періодичні чинники, то бажано, щоб діапазон перегляду охоплював повний період такого впливу. З цього погляду переважно збільшення довжини діапазону. Однак при цьому необхідно враховувати той факт, що є небажаним потрапляння в діапазон перегляду більше однієї точки структурної «розладки» ряду. З цього погляду діапазон перегляду бажано звузити.

Важливим критерієм вибору довжини діапазону перегляду є його співвідношення з «довжиною вікна» L (параметром сингулярного розкладання).

Виходячи з рекомендацій щодо вибору «довжини вікна» [114], величина $\boldsymbol{L}$ бажано повинна бути близька до половини довжини ряду (у нашому випадку близька до половини довжини діапазону перегляду $\boldsymbol{D}$) і при цьому кратної періоду періодичної компоненти, що присутня в ряді. Виходячи з цього, бажано вибрати довжину діапазону перегляду, як мінімум, удвічі перевищує найбільший період передбачуваних періодичних компонентів ряду.

Для досягнення найкращих результатів в ідентифікації структурних «розладок» часових рядів рекомендується використання кількох діапазонів перегляду з різною довжиною.

3.4 Перевірка достовірності запропонованого методу пошуку «розладнання»

Перевірка запропонованого методу була виконана на тестових прикладах часових рядів із сильною роздільністю і слабою роздільністю.

3.4.1 Аналіз часового ряду із сильною роздільністю (тестовий приклад test-1)

Тестовий приклад – test_1. Цей тестовий приклад має часовий ряд із сильною роздільністю. Приклад test_1 включає низку тестів: test 1.1, test 1.2, test 1.3, test 1.4.

Досліджується базовий часовий ряд y_{test1} довжиною $N = 91$, який представляє собою суму гармонік: $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$, $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$, $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{11}t\right)$.

У ряді є сильна роздільність (питання роздільності розглянуті в [106, 107].

Мета тестових прикладів (test 1.1, test 1.2, test 1.3, test 1.4) перевірити можливість виділити в даних появу нової структурної компоненти, зникнення структурної компоненти, зміну амплітуди однієї із структурних компонентів. Для всіх прикладів в момент часу $t = 46$ відбуваються різні структурні зміни, які досліджувалися.

Результати аналізу розкладання часового ряду y_{test1} на структурні складові представлені у Додатку Б (рис. Б.15 - Б.23) (при дослідженнях використовувався програмний продукт "Caterpillar" [119]).

3.4.2. Аналіз часового ряду із слабкою роздільністю (тестовий приклад test 2)

Досліджувався базовий часовий ряд y_{test2} (рис. 3.3) довжини $N = 91$, що є сумою гармонік: $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$, $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$, $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$.

У ряді є слабка роздільність.

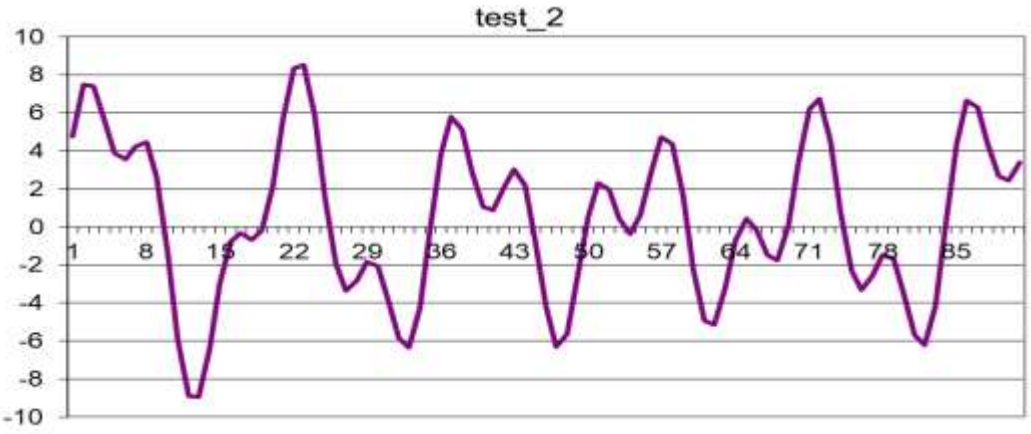


Рисунок 3.3 – Часовий ряд y_{test2}

Приклад test 2 містить тестові реалізації ідентифікації структурних змін: test 2.1 і test 2.2.

У момент часу $t = 46$ у ряді y_{test2} відбуваються різні структурні зміни: поява нової структурної складової (test 2.1), зміна амплітуди однієї із структурних компонентів (test 2.2).

Результати розкладання часового ряду $y_{test2.1}$ і $y_{test2.2}$ на структурні складові представлені у Додатку В (test 2.1 - рис. В.31 - рис. рис. В.36 і test 2.2. - рис. В.37 - В.45).

Під час досліджень використовувався програмний продукт "Caterpillar" [119].

Проведені дослідження методики на тестових прикладах дозволили підтвердити можливість її використання для аналізу часових рядів з метою виявлення відхилень.

Запропонована методика забезпечує можливість одночасного моніторингу якості електричної енергії та опосередкованого оцінювання якості теплопостачання.

3.5 Обробка реальних даних споживання електроенергії запропонованим методом

Для обробки було використано реальні дані постачання теплової енергії та споживання електричної енергії Олексіївським житловим масивом міста Харкова за період 2020–2021 років. Розглядався інтервал тривалістю один астрономічний рік (365 днів): з 01.06.2020 по 31.05.2021.

Метою аналізу було виявлення відхилень у споживанні електричної енергії, які у взаємозв’язку з параметрами теплопостачання можуть свідчити про режим надспоживання електричної енергії споживачами, що проявляється в провалах напруги.

Часовий ряд було обрано довшим за опалювальний сезон з метою забезпечення можливості відстеження надспоживання електричної енергії протягом усього року. Розглядався ряд, що відповідає періоду з 01.06.2020 по 31.05.2021, при цьому його довжина становить N=365 (точка з номером 1 відповідає даті 01.06.2020, а точка з номером 365 – даті 31.05.2021).

Оскільки метою було виявлення відхилень на основі взаємопов’язаних енергетичних даних, у дослідженні розглядалися показники споживання електричної енергії та дані щодо відпуску теплової енергії. (представлені на рис. 3.4). Для аналізу додатково наведено значення зовнішньої температури за обраний період (рис. 3.5).

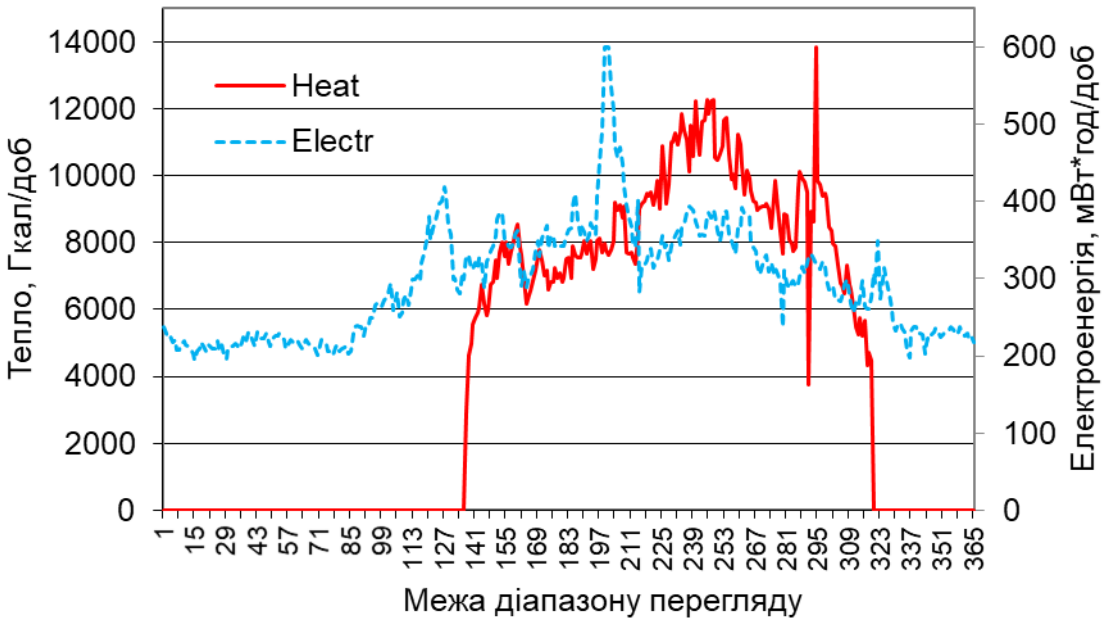


Рисунок 3.4 – Споживання електроенергії Олексіївським житловим масивом м. Харкова і добова відпустка тепла ТЕЦ-5 у період з 01.06.2020 по 31.05.2021

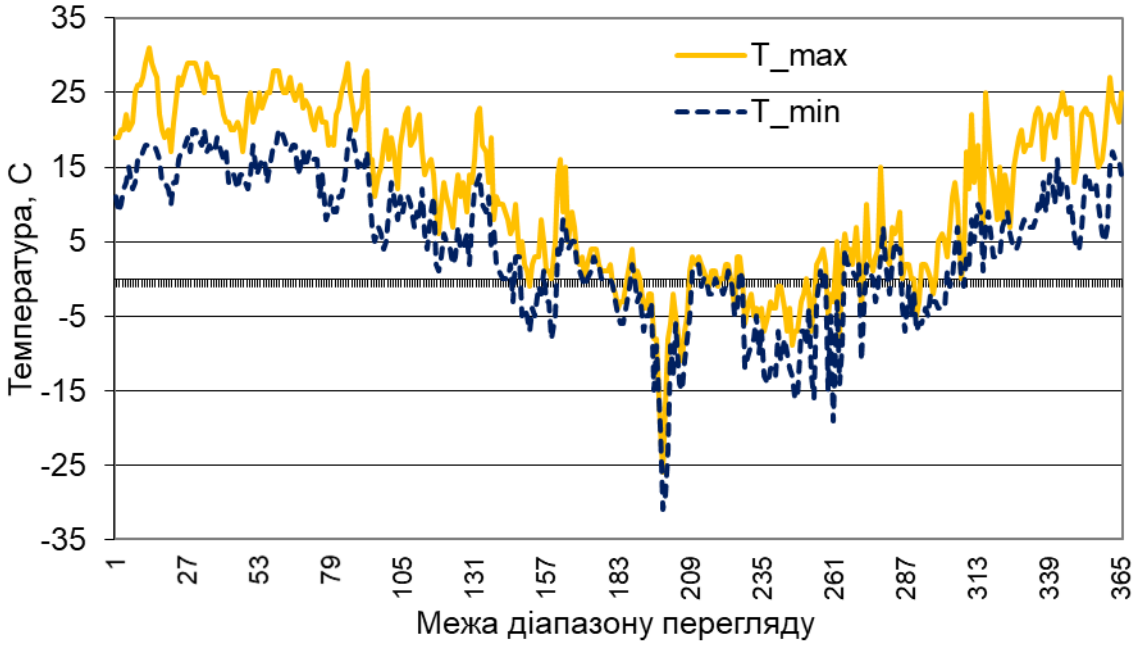


Рисунок 3.5 – Температура повітря в м.Харкові у період з 01.06.2020 по 31.05.2021

На рис. 3.4 точка 137 відповідає даті 15.10.2020 - початок опалювального періоду, точка 319 відповідає даті 15.04.2021 - закінчення опалювального періоду.

У відповідності до методики по пошуку «розладнань» аналіз було виконано в три етапи:

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

3.5.1 Результати експрес-аналізу

Дослідження проводились при діапазоні перегляду D=60 (два місяці), довжині вікна L=30 (один місяць) (довжина ряду N=365) за допомогою програмного продукту [119] (Метод сингулярно-спектрального аналізу був застосований без центрування та нормування). Динаміка значень власних чисел представлена на рис. 3.6.

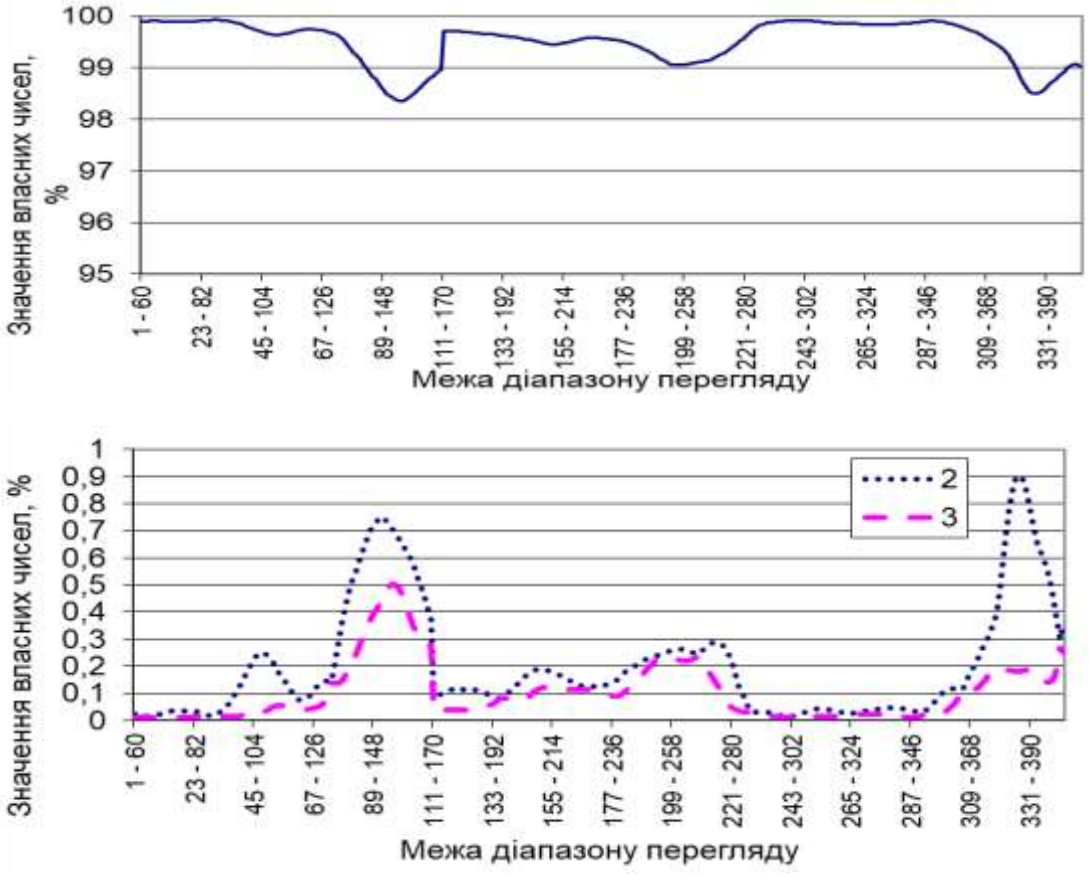


Рисунок 3.6 – Динаміка власних чисел (довжина діапазону перегляду D=60)

а) 1-ї власної трійки б) 2-ї та 3-ї власних трійок

Проведений експрес-аналіз дає змогу виявляти точки та інтервали структурних змін часового ряду, а також свідчить, що на формування ряду даних споживання електричної енергії побутовими споживачами у літній період впливає переважно один фактор, тоді як у період опалювального сезону – інші фактори, причому за умов суттєвого зниження зовнішньої температури їхній вплив є значним.

3.5.2 Детальний аналіз.

Добовий профіль споживання електричної енергії побутовими споживачами формується за рахунок її використання для освітлення, опалення (за умов недостатньої якості централізованого теплопостачання) та задоволення побутових потреб.

Часовий ряд споживання електроенергії побутовими споживачами має складну багатокомпонентну будову, що обґрунтовує доцільність його декомпозиції на окремі складові для подальшого поглибленого дослідження.

Для детального аналізу цього ряду доцільно враховувати зміну власних трійок під час переміщення вікна перегляду. Такий підхід дозволяє ідентифікувати характер поведінки відповідних структурних компонент, відновлених за кожною власною трійкою, а також оцінити динаміку структурних змін і варіацію значущості окремих складових у процесі трансформації структури часового ряду.

Нижче подано результати розкладання часового ряду споживання електроенергії на структурні компоненти із застосуванням методу сингулярно-спектрального аналізу (довжина вікна L = 100, без процедур центрування та нормування), реалізованого за допомогою програмного забезпечення. [119]. Що дозволило виділити основні компоненти (рис. 3.7).

Із часового ряду споживання електроенергії виділено першу структурну компоненту, яка характеризується найбільшою часткою значущості та відповідає першій власній трійці (і, відповідно, найбільшому власному числу). Її графічне подання наведено на рис. 3.7.а.

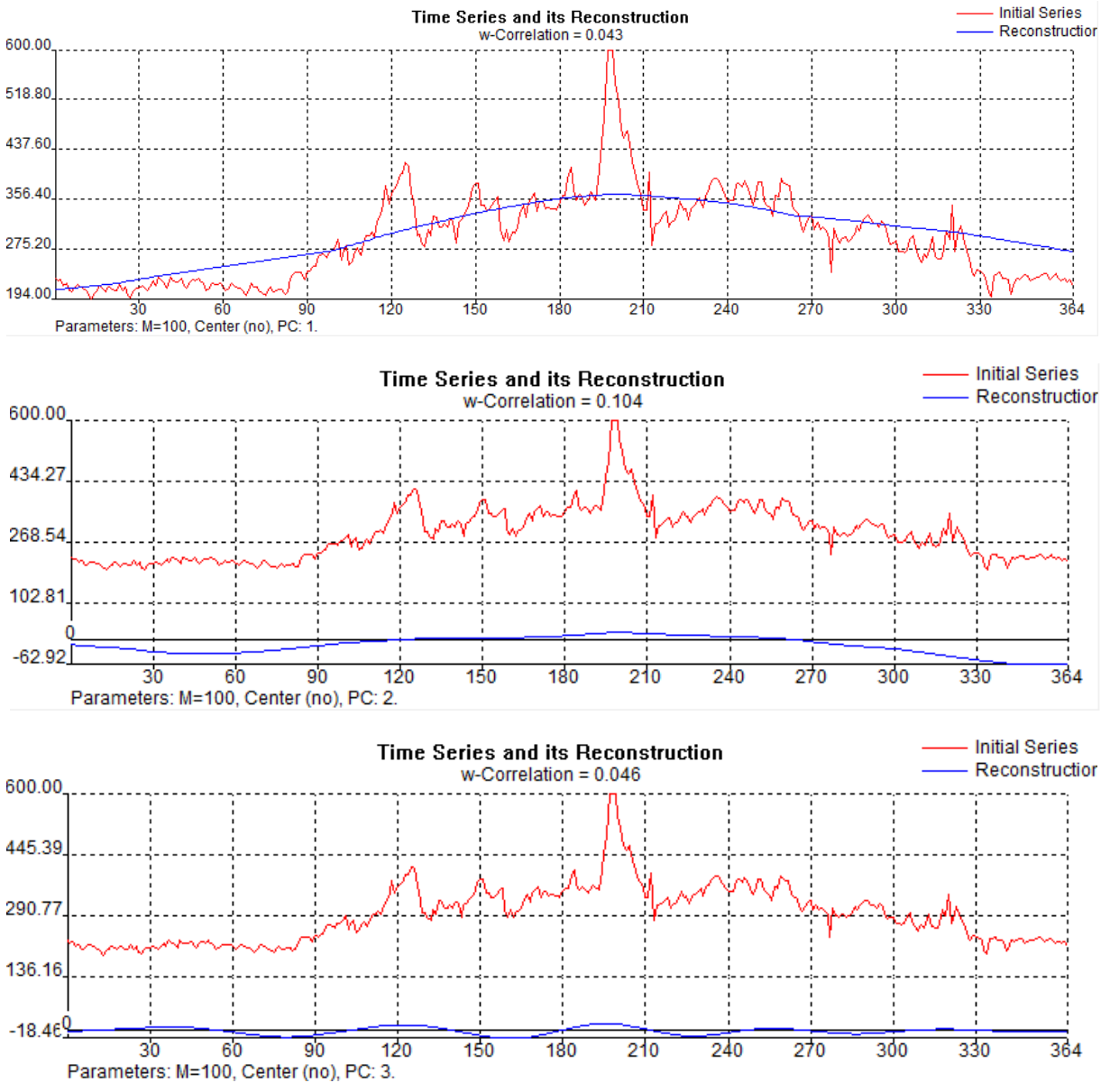


Рисунок 3.7 – Вилучення з низки даних споживання електроенергії структурних компонентів (період з 01.06.2020 по 31.05.2021) а) перша компонента (97,724%) б) друга компонента (0,877%) в) третя компонента (0,235%)

Порівняння отриманих результатів (рис. 3.7.а) з графіком, наведеним на рис. 3.8, який відображає криві річного споживання електроенергії, дає підстави стверджувати, що виділена перша структурна компонента формується до настання опалювального сезону та узгоджується з відповідною динамікою. Отже, перша структурна компонента визначається впливом фактора «довжина світлового дня», відтворює характер річної кривої електроспоживання

побутових споживачів і не враховує складову, пов'язану з використанням електроенергії для обігріву електронагрівальними приладами. (рис. 3.9).

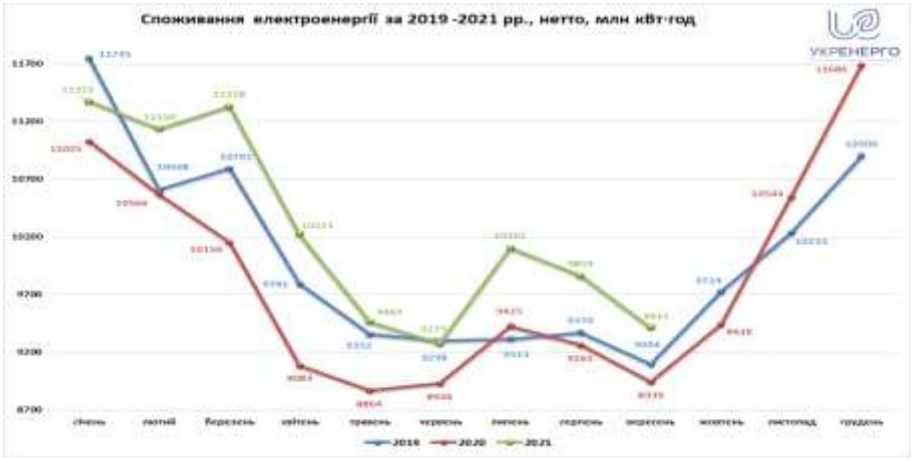


Рисунок 3.8 – Крива споживання електроенергії зима літо (Україна 2019-2021рр)

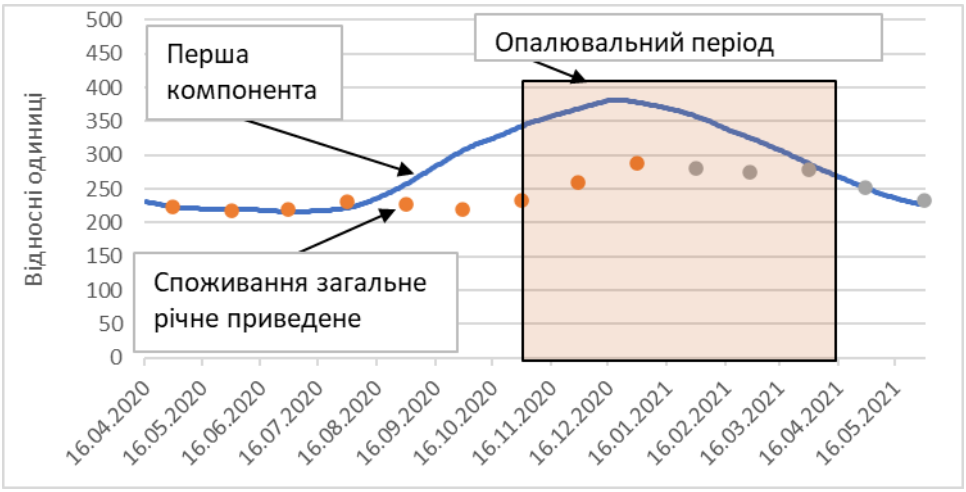


Рисунок 3.9 – Порівняння споживання електрики загальнодержавного із першою компонентою (період з 16.04.2020 по 16.06.2021)

У літній період саме перша компонента визначає формування часового ряду споживання електроенергії побутовими споживачами та досягає максимального рівня значущості.

Водночас значущість другої та третьої компонент (рис. 3.6.б , пов’язаних із впливом зовнішньої температури та якістю теплопостачання, залишається мінімальною (близькою до 0 %) і практично не зазнає змін. Це свідчить про їхню відсутність істотного впливу на формування часового ряду електроспоживання у літній період.

З початком опалювального періоду та зниженням зовнішньої температури відбувається трансформація структури часового ряду споживання електроенергії побутовими споживачами. Зокрема, зменшується внесок першої компоненти, зумовленої фактором «довжина світлового дня», що проявляється у зниженні значень першого власного числа, яке відповідає першій власній трійці (рис. 3.6.а). водночас зростає значущість другої та третьої компонент, що підтверджується збільшенням відповідних власних чисел (рис. 3.6.б).

Отже, структурні зміни у даних споживання електроенергії побутовими споживачами на тлі істотного зниження зовнішньої температури свідчать про недостатню якість теплопостачання. Це підтверджує доцільність моніторингу стану систем теплопостачання шляхом аналізу структурних трансформацій часового ряду електроспоживання.

3.5.3 Додатковий аналіз (дослідження низки залишків).

Для підвищення точності діагностики моментів структурної «розладки» часового ряду споживання електроенергії виконують додатковий етап аналізу. З цією метою досліджують ряд залишків, сформований після вилучення компоненти (або групи компонент) з найбільшою значущістю. У межах даного експерименту доцільно проаналізувати залишковий ряд, отриманий після виключення першої головної компоненти. Такий підхід забезпечує отримання додаткової інформації щодо часової локалізації структурних змін у споживанні електроенергії побутовими споживачами.

На рис. 3.10 наведено інтервал 107–137 (15.09.2020 – 15.10.2020), який не охоплює опалювальний період. У межах цього відрізка простежується залежність обсягів споживання електричної енергії від температури повітря.

Зокрема, на інтервалі 117–130 (25.09.2020 – 08.10.2020) зі зниженням температури спостерігається відповідне зростання електроспоживання.

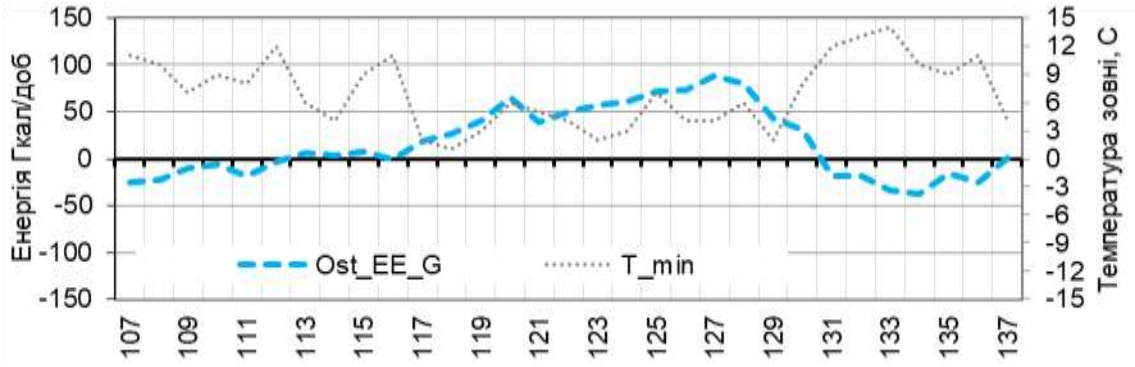


Рисунок 3.10 – Залишки ряду споживання електричної енергії і зовнішня температура до початку опалювального сезону

На рис. 3.11 представлено інтервал 193–213 (10.12.2020 – 30.12.2020), який відповідає опалювальному періоду. У межах відрізка 196–209 (13.12.2020 – 26.12.2020) фіксується різке зниження температури, що супроводжується зростанням залишкової складової ряду споживання електроенергії.

Водночас збільшення обсягів подачі теплової енергії спостерігається лише в точці 204 (21.12.2020), що призвело до відповідного зменшення споживання електричної енергії.

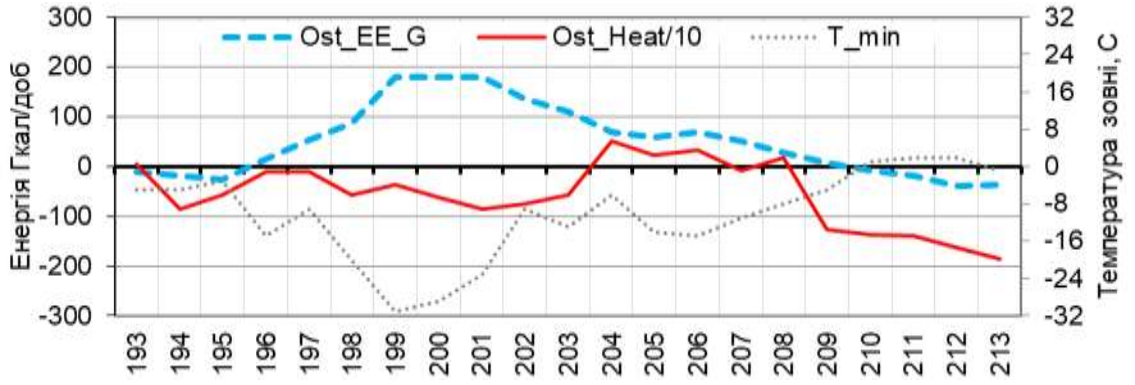


Рисунок 3.11 – Фрагмент ряду залишків, отриманого після вилучення першої компоненти з даних споживання електроенергії, під час опалювального періоду 10.12.2020 – 30.12.2020

На прикладах наведених на рисунках 3.10 і 3.11 показано аналіз залишків часового ряду споживання електричної енергії у поєднанні з даними щодо обсягів теплової енергії та зовнішньої температури. Такий підхід дає змогу фіксувати моменти структурних змін у часовому ряді. У результаті виявлено «розладки», зумовлені впливом зовнішньої температури, якістю теплопостачання, а також міжсезонними змінами режимів споживання.

На основі отриманих результатів аналізу можна оцінити необхідний обсяг теплової енергії, достатній для зменшення провалів напруги в електричній мережі. Динаміка режиму надспоживання електроенергії та поява провалів напруги дають змогу ідентифікувати момент початку додаткової подачі енергії в мережу. Водночас за абсолютними значеннями споживання, що відображаються залишками відповідної компоненти, визначається величина додаткового теплового потоку. Різниця між обсягом теплової енергії, поданої в мережу, і величиною надспоживання електроенергії відповідає мінімально необхідному рівню теплової енергії, який забезпечує умови, за яких споживач не переходить у режим підвищеного електроспоживання.

Результати розрахунку коригувального обсягу теплової енергії наведено на рис. 3.12. Використання зворотного зв'язку за провалами напруги разом із коригуванням подачі теплової енергії дозволяє суттєво знизити рівень провалів напруги. Внаслідок цього покращуються і інші якісні характеристики електричної енергії в мережі.

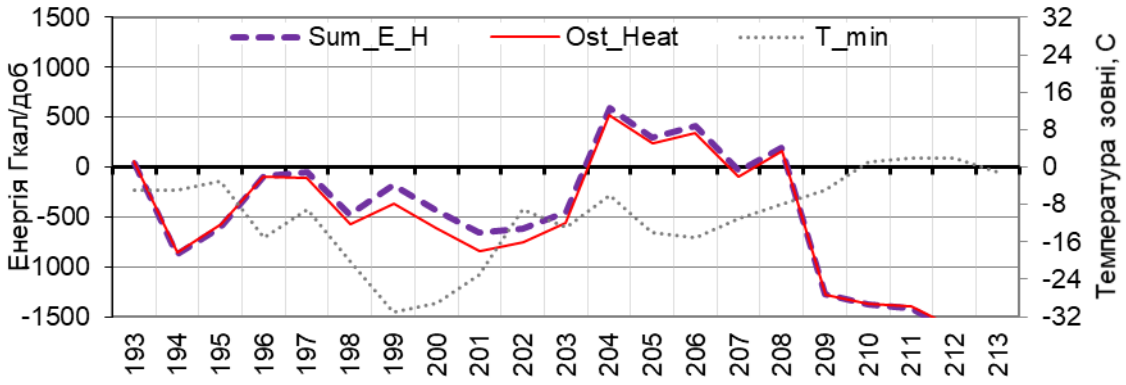


Рисунок 3.12 – Розраховано коригувальний обсяг теплового потоку, необхідний для забезпечення умов зниження рівня провалів напруги в електричні мережі.

Застосування запропонованого підходу забезпечує не лише виявлення та діагностику структурних змін у часовому ряді електроспоживання, а й дозволяє трансформувати дані про обсяги споживаної електроенергії в індикатори якості теплопостачання. Це створює передумови для розроблення комп'ютерної системи моніторингу та керування провалами напруги в електричній мережі через пов'язаність енергій.

Висновки по розділу 3

Описано основні чинники виникнення провалів напруги в електричній мережі.

Обрано підхід до зменшення провалів напруги в електричній мережі, що ґрунтується на зниженні надспоживання електричної енергії побутовими споживачами. Показано наявність взаємозв'язку між якістю теплопостачання та провалами напруги в електричній мережі.

Для визначення моментів виходу мережі в режим надспоживання запропоновано здійснювати моніторинг електричної мережі на наявність провалів напруги. Дані, отримані в результаті такого моніторингу, розглядаються як часові ряди.

Для цих часових рядів запропоновано застосування математичної обробки даних, метою якої є виявлення структурних «розладок», що виникають унаслідок надспоживання електричної енергії, а також формування керуючих впливів для диспетчерської системи з метою коригування подачі теплової енергії споживачам.

1. Розроблено метод виявлення провалів напруги заснований на застосуванні математичного методу сингулярно-спектрального аналізу часових рядів, що дозволяє визначати пошук розладки часових рядів і досліджувати їх стан.

2. Дано рекомендації щодо застосування розробленого методу виявлення провалів напруги у три етапи:

а) Експрес-аналіз (аналізується лише динаміка значень власних чисел коваріаційної матриці під час руху діапазону перегляду).

б) Детальний аналіз (враховуються зміни у власних трійках під час руху діапазону перегляду).

в) Додатковий аналіз (аналізується ряд залишків після отримання певних значущих структурних складових часового ряду).

3. Наведено рекомендації щодо вибору значення параметра D – діапазону перегляду, основного параметра діагностики структурних змін часових рядів запропонованого методу виявлення провалів напруги на.

4. Розроблено серію тестових прикладів для апробації наведеного методу виявлення провалів напруги на діагностиці структурних змін часових рядів, як для рядів із сильною, так і для рядів зі слабкою роздільністю.

5. На підставі результатів експериментальних досліджень для часових рядів із сильною роздільністю зроблено висновок про ефективність застосування методу виявлення провалів напруги для діагностики «розладки» у структурі часових рядів. При цьому можна як встановити момент часу їх виникнення, так й ідентифікувати характер структурних змін часового ряду.

6. За результатами дослідження ряду зі слабкою роздільністю зроблено висновок про те, що запропонований метод виявлення провалів напруги може бути використано обмежено. У певних випадках існує можливість ідентифікації моменту виникнення структурних змін залишків, але при цьому не завжди можна виявити характер цих змін.

7. Проведені дослідження на реальних даних за допомогою розробленого методу виявлення провалів напруги дозволяють визначити проміжки часу із провалами напруги у ряді даних електроспоживання із впливом пов’язаного ряду кількості відпущеного тепла населенню. Що підтверджує можливість використання запропонованого методу виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов’язаних потоках теплової та електричної енергії.

РОЗДІЛ 4 ЕКОНОМІЧНИЙ АНАЛІЗ ЗАПРОПОНОВАНОГО МЕТОДУ ВИЯВЛЕННЯ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

4.1 Основні моменти методики обрахунку економічних збитків від неякісної електричної енергії

Розрахунок економічного ефекту від впровадження заходів по покращенню якості електричної енергії проводиться за визначенням точки беззбитковості (або порогу рентабельності) [120]. Точка беззбитковості (англ. Break-Even Point, BEP) – це такий обсяг виробництва чи продажів, при якому загальні витрати підприємства дорівнюють загальним доходам, тобто фірма не має ні прибутку, ні збитку [121].

Аналіз взаємозв'язку "витрати – обсяг – прибуток" (Cost – Volume – Profit Analysis) – метод системного дослідження взаємозв'язку витрат, обсягу діяльності та прибутку підприємства з метою визначення:

– обсягу продажу, що забезпечує відшкодування всіх витрат та отримання бажаного прибутку;

– величини прибутку за певного обсягу продажу;

– впливу зміни величини витрат, обсягу та ціни реалізації на прибуток підприємства;

– оптимальної структури витрат.

Опис аналізу беззбитковості наведений в [122, 123]. На підставі аналізу беззбитковості можна спрогнозувати момент досягнення точки беззбитковості, тобто перехід підприємства до розряду прибуткових.

Розрахунок будується на наступних кроках:

1 вираховується загальний збиток від неякісної електроенергії в електричній мережі

2 вираховуються витрати на впровадження заходу (постійні і змінні витрати)

3 вираховується дохід від впровадження заходу.

4.2 Розрахунок беззбитковості запропонованого методу виявлення провалів напруги в електричній мережі

Методика обрахування збитків від неякісної електричної енергії була розроблена авторами: Самойленко І.О., Гриб О.Г., Сендерович Г.А. [123, 124].

Економічний розрахунок проводився на матеріалах отриманих від обстеження підприємства.

Спостереження якісних параметрів електричної енергії в електричній системі підприємства виконувалося проміжками 30, 60 і 120 хв.

Збитки, пов’язані із персоналом: заробітна платня, виплати за простій, виплати за над нормовані роботи і інше, проводилися із урахуванням можливості використання штатних ремонтно-аварійних бригад і використання робітників на інших суміжних роботах під час порушення електропостачання.

Розрахунок проводиться наступним чином.

1 за методикою економічного розрахунку: визначається оцінка технічного збитку при відхиленні показників якості електричної енергії від нормованих значень

2 визначається вартість додатково поданої або неподаної теплової енергії до мережі для покращення якісних показників

3 розраховуються сумарні витрати на покращення якісних показників

4.2.1 Розрахунок збитку від низької якості електроенергії

За методикою [124], проведено розрахунок величини економічного збитку від зниження якості електроенергії на районі міста, для яких було проведено заміри якості електричної енергії (дані замірів представлені в Додатку А)

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	Кіль-кість, шт	Потуж ність, кВт	Ціна, грн (за оди-ницю)	Встановлена номінальна потужність, кВт	Вартість, тис. грн.	Кількість годин роботи
1	Насоси на асинхронному двигуні	19	1,5	62685	28,500	1191,02	8760
2	Освітлювальні приймачі, у т.ч.:						
	- лампи накалювання	38	75	40,00	2,850	1,52	7700
	- газорозрядні лампи	418	36	84,00	15,048	35,11	3600

Додаткові втрати активної потужності в електрообладнанні, обумовлені несиметрією та несинусоїдальністю напруги.

Визначаємо додаткові втрати активної потужності в електричному обладнанні (ΔР) при k’ = 0,5 ; k” = 0,3:

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

Складова економічного збитку, зумовлена додатковими втратами активної потужності (Здв), становить відповідну частину загального економічного ефекту, пов'язаного з погіршенням режимів роботи електричної мережі:

$$З_{ДВ} = 0{,}01 \cdot B_E \cdot \sum_{i=1}^{n} \Delta P_i \cdot T_i = 0{,}01 \cdot 6{,}9 \cdot 38{,}86 \cdot 8760 = 234{,}89 \text{ тис. грн/рік.}$$

де: B_E – вартість 1 кВт·год. втрат електроенергії, коп./кВт·год (6,9 – вартість електроенергії, грн за 1 кВт*год для підприємства на 2025 рік);

ΔP_I – додаткові втрати активної потужності в і-й групі однорідних елементів, кВт;

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

n – число аналізованих груп однорідних елементів.

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

$$B_I = E_H \cdot K_I + И_I = 328{,}92 \text{ тис. грн/рік}$$

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

K_I – вартість насосів з асинхронними двигунами, тис грн.

Визначається складова економічного збитку, зумовлена скороченням терміну служби електрообладнання ($З_{ТС}$).

$$З_{ТС} = \sum_{i=1}^{n} B_I \cdot \left(\frac{\gamma_I - 1}{1 + E_H \cdot T_{HI}}\right) =$$

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

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

γ_I – кратність зниження терміну служби для і-ї групи однорідних елементів, в.о.;

E_H – нормативний коефіцієнт ефективності капіталовкладень, 1/рік;

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

Вплив від несиметрії не розглядаємо $З_{ЕВ}$ = 0 грн./рік.

Економічний збиток від несиметрії та несинусоідальності напруги ($З_Н$):

$$З_Н = З_{ДВ} + З_{ТС} + З_{ЕВ}$$

$З_Н$ = 234,89 + 804,42 + 0 = 1039,31 тис. грн./рік.

Визначимо економічний збиток від відхилень напруги для освітлювальних приймачів на досліджуваних підстанціях за умови рівномірного розподілу освітлювального навантаження по фазах. При цьому математичні очікування відхилень напруги, відповідно до результатів вимірювань, становлять: U_A = 0,0384; U_B = 0,0577; U_C = 0,0600.

Визначаємо значення коефіцієнтів економічної невигідності 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 потуж-ність, кВт	Вартість, тис.грн.	Кількість годин роботи	a	c
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:

$$З_{відх} = \sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{2} P_{освij} \cdot T_{освij} \cdot \left(a_j \cdot u_i^2 + c_j \cdot u_i\right)$$

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

Визначається сумарний річний економічний збиток, зумовлений погіршенням якості електричної енергії ($З_Я$):

$$З_Я = З_Н + З_{ВІДХ} = 1039{,}31 + 101{,}79 = 1141{,}10 \text{ тис. грн/рік}$$

4.2.2 Розрахунок технічного збитку, обумовленого відхиленням показників якості електричної енергії від нормованих значень

Визначається величина технічного збитку, зумовленого відхиленням показників якості електричної енергії від їх нормованих значень ($З_Т$):

$$З_Т = З_я + З_л = 1141{,}1 + 193{,}3 = 1334{,}4 \text{ тис. грн/рік}$$

4.2.3 Розрахунок додаткового обсягу теплової енергії для забезпечення умови припинення провалів напруги в електричній мережі.

Розрахунок було виконано в розділі 3. Графік залишків ряду електричної енергії представлено на рис. 4.1

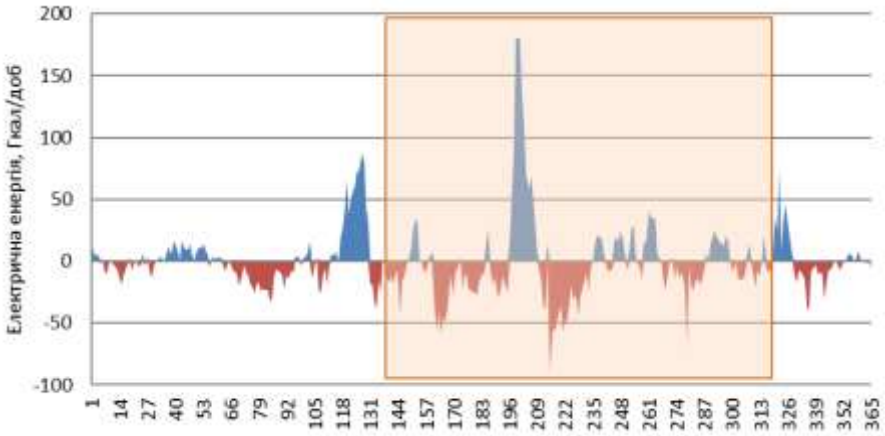


Рисунок 4.1 – Графік залишків ряду електричної енергії (виділена зона - опалювальний період)

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

Розглянемо період 137–319 (15.10.2020–15.04.2021), що відповідає опалювальному сезону (рис. 4.2). У межах цього інтервалу можливе виконання регулювання подачі теплової енергії до споживачів з урахуванням поточних умов споживання та зовнішніх температурних факторів.

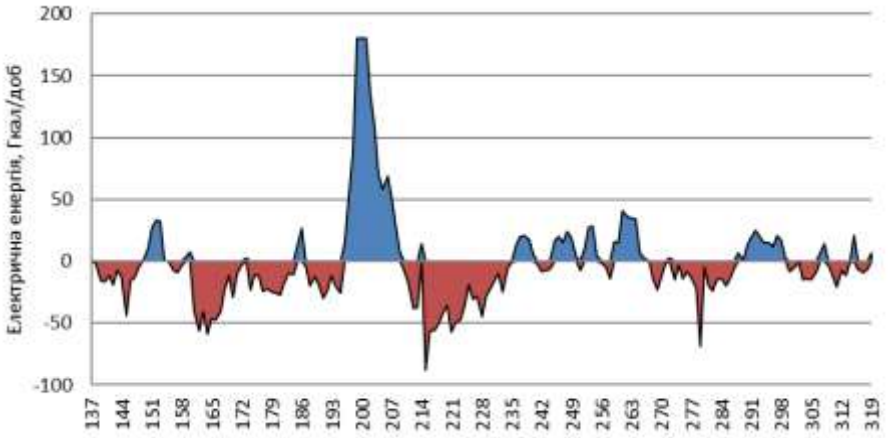


Рисунок 4.2 – Графік залишків ряду електричної енергії (тільки 137-319 (15.10.2020-15.04.2021 опалювального період)

Для створення умов невиникнення провалів напруги, достатньо компенсувати позитивні зони графіка (рис. 4.2 синя зона). Однак для досягнення більшого економічного ефекту доцільно також враховувати негативну зону графіка (рис. 4.2 червона зона), коли споживання електричної енергії істотно зменшується, що вказує на можливість зниження обсягів подачі теплової енергії.

Витрати теплової енергії ($С_Т$) при цьому складаються з двох доданків.

$$С_Т = С_П – С_Н$$

де $С_П$ – вартість позитивної частини залишків ряду електричної енергії;

$С_Н$ – вартість негативної частини залишків ряду електричної енергії.

Загальна кількість електричної енергії (за опалювальний період), що відповідає позитивній частині залишків ряду, становить 2040,5 Гкал. Водночас загальна кількість електричної енергії, що відповідає негативній частині залишків ряду, становить –2324,7 Гкал.

При вартості 1 Гкал = 1539,5 грн загальна вартість додатково поданої споживачам енергії становить:

$$С_Т = 2040,5 \cdot 1539,5 – 2324,7 \cdot 1539,5 = -437,53 \text{ тис.грн.}$$

За результатами розрахунку встановлено, використання способу застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг в електричній мережі дозволяє отримати точне регулювання теплового потоку що дає змогу не лише зменшити кількість провалів напруги але й забезпечити вивільнення теплової енергії на суму 437,53 тис.грн.

4.2.4 Розрахунок економічного ефекту

Економічний ефект визначається через розрахунок точки беззбитковості як найбільш наочного економічного показника. Передбачається використання способу застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг в електричній мережі протягом 10 років.

Величина технічних збитків (*Зт*), розрахована у попередньому підрозділі, приймається як плановий рівень збитків без впровадження зазначених заходів на горизонті 10 років.

Далі виконується розрахунок точки беззбитковості заходів із підвищення якості електричної енергії з урахуванням зменшення витрат, скоригованих на коефіцієнт ефективності заходів (*Км*).

Збитки вже були розраховані в (п4.2.2)

Дохідна частина буде складатися із величини зменшення значення технічного збитку (*Зт*) на величину коефіцієнта ефективності заходів (*Км*) за мінусом вартості самих заходів (*См*).

$$Д = Зт*Км – См$$

Хоча в роботі розглядався сценарій повного усунення провалів напруги електричної енергії за рахунок зменшення «надспоживання», слід враховувати, що чинники провалів напруги є різноманітними і не обмежуються лише цим явищем. Тому, спираючись на практичні дані, приймаємо коефіцієнт

ефективності заходів *Km* =0,7. Таким чином, 70% коштів, які в іншому випадку були б витрачені як збитки, залишаються у розпорядженні підприємства.

Витрати на впровадження заходів включають: придбання діагностичного обладнання, а також витрати на його впровадження, зокрема:

– облаштування інформаційної мережі;

– електричне підключення;

– встановлення терміналів збору даних;

– розробку та налагодження програмного забезпечення.

В якості приладів збору інформації по якісним показникам електричної енергії пропонується – аналізатор якості електроенергії Sonel PQM-700 WMPLPQM700

Результати розрахунку витрат на впровадження представлені в таблицях табл. 4.3, 4.4

Таблиця 4.3 – Таблиця постійних витрат на впровадження заходу

№	Найменування	Сума, тис.грн
1	Вартість приладу Sonel PQM-700 WMPLPQM700	91,32
2	Вартість встановлення, підключення і налаштування приладу	12,50
3	Вартість проведення навчання персоналу	30,00
4	Місце збору даних:	91,04
	приймальний блок	9,20
	комп’ютера для обробки і зберігання даних	74,50
	комп’ютерна мережа для передавання даних	7,34
5	Вартість програмного продукту для обробки даних	162,54
	написання програмного продукту	126,54
	тестування	12,00
	встановлення на робоче місце (доведення)	24,00
	Всього:	**387,40**

Таблиця 4.4 – Таблиця змінних витрат на впровадження заходу (за рік)

№	Найменування	Сума, тис.грн
1	Заробітна плата оператора АРМ	287,10
2	Заробітна плата електрика	247,08
3	Витрати на електричну енергію	25,69
	споживання приладом	3,02
	споживання комп’ютера для обробки і зберігання даних	22,67
	Всього:	**559,87**

Доходну частину визначаємо як зменшення розрахованого технічного збитку з урахуванням коефіцієнта ефективності заходів, який прийнято рівним 0,5. Тоді:

Д = Зт*Км = 1334,4*0,5 = 666,70 тис.грн.

Строк окупності вкладень (*E*) становитиме: Е = 3,6 роки (рис. 4.3)

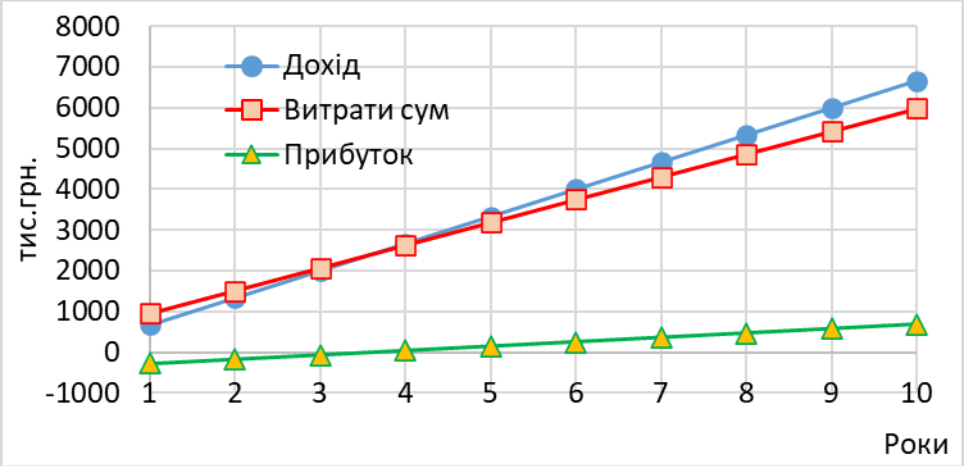


Рисунок 4.3 – Графік точки беззбитковості

Таким чином, використання запропонованого способу застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг в електричній мережі забезпечує позитивний ефект, що полягає у поліпшенні режимів роботи електричної мережі, забезпеченні відповідності показників якості електричної енергії у споживача нормативним вимогам та створенні умов для оптимізації транспортування електричної енергії з метою зменшення витрат на її передачу.

Розроблені рекомендації по зменшенню провалів напруги в електричній мережі підприємства теплопостачання

Рекомендації по зменшенню впливу провалів напруги можна представити в двох напрямах: боротьба із наслідками дії провалів напруги на електричне обладнання і ліквідація джерел появи провалів напруги.

Що стосується боротьби із наслідками провалів напруги на електричне обладнання, то такі дії добре структуровані і розглядалися в розділі 2 п.2.2. До таких можна віднести Технічні заходи на рівні мережі, Заходи на рівні споживача, Організаційні та нормативні заходи. В п2.2 надано опис таких дій і їх переваг. Вимоги до приладів по зменшенню провалів напруги для підприємства теплопостачання наведено в п2.4. Конкретний підбір приладу зменшення провалів напруги наведено в п2.5, де рекомендовано прилад SAGFiGHTER™ від компанії UST, показано його переваги.

Що стосується ліквідації джерел появи провалів напруги, то самі причини появи провалів напруги на основі наукової літератури представлені в п2.1. До таких відносять: Короткі замикання в мережі, Пускові струми потужних асинхронних двигунів, Комутаційні процеси силового електрообладнання, Перемикання трансформаторів, Надмірне навантаження ділянок мережі, Зовнішні фактори.

В роботі приділено увагу причинам пов’язаним із надмірним навантаженням ділянок мережі. В роботі розроблено метод виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов’язаних потоках теплової та електричної енергії. Саме за допомогою запропонованого методу пропонується виробляти дії по недопущенню провалів напруги. Розділ 3 повністю присвячено опису запропонованому методу виявлення провалів напруги в електричній мережі, його особливостям. Запропоновано побудову системи моніторингу, що дозволяє отримувати та обробляти дані сумісного споживання теплової та електричної енергії. Потокові дані обробляються математичним методом сингулярно-спектрального аналізу з метою пошуку розладки часових рядів – режимів роботи електроенергетичної системи коли виникають падіння напруги. В роботі розроблено спосіб застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг в електричній мережі. Запропоновано склад технічних засобів по впровадженню способу застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг. Наприклад, для контролю

якості електричної енергії (контроль провалів напруг) розглядався аналізатор якості електроенергії Sonel PQM-700 WMPLPQM700. Склад технічних засобів по способу застосування запропонованого методу **дозволяє проводити економічні розрахунки для впровадження .**

Висновки по розділу 4

В розділі було проведено наведена методика обрахунку економічних збитків від низької якості електричної енергії яка включала і надсікли від провалів напруги в електричній мережі.

Виконано розрахунок збитків від зниження якості електричної енергії. Також проведено розрахунок додаткового обсягу теплової енергії, необхідного для забезпечення умов зменшення «надспоживання» електричної енергії, що, у свою чергу, дозволяє знизити кількість провалів напруги в мережі. Додатково визначено економічний ефект заходу. Отримано результат, який свідчить про досягнення точки беззбитковості запропонованого заходу через 3,6 року після його впровадження.

Описано рекомендації по зменшенню провалів напруги в електричній мережі підприємства теплопостачання.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішена актуальна науково-технічна задача із розробки методів та засобів зменшення кількості провалів напруги за рахунок створення умов недопущення їх виникнення в електричній мережі підприємства.

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

1 В рамках дисертаційної роботи були досліджені основні причини виникнення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства, розглянуто способи та засоби боротьби із зменшенням впливу провалів напруг, **що дозволило** провести класифікацію причин і визначити найнебезпечніші чинники провалів напруг, а також обрати дієві способи боротьби із провалами напруги;

2 Вперше розроблено метод виявлення провалів напруги в електричній мережі теплопостачаючого підприємства шляхом застосування сингулярно-спектрального аналізу по взаємопов’язаних потоках теплової та електричної енергії **що дозволило** визначити час появи провалу напруг та обсяг недостатньої електричної енергії для недопущення виникнення провалів напруг;

3 Вперше розроблено спосіб виявлення провалів напруг із зворотнім зв’язком по цільовому параметру і процедурою підготовки даних під вимоги розробленого методу **що дозволило** сформувати уточнені керуючі команди з урахуванням часу та обсягу необхідного додатково відпуску теплової енергії теплопостачаючим підприємством з метою зменшення надспоживання електричної енергії тим самим прибираючи основний чинник виникнення провалів напруг;

4 Проведено перевірку працездатності розробленого методу виявлення провалів напруги на даних енергопостачання одного району міста **що дозволило** отримати підтвердження працездатності розробленого методу виявлення провалів напруги, визначено основну технологію Dynamic Voltage Restorer для

технічних засобів боротьби із провалами на підприємстві теплопостачання та запропонувати до використання конкретний прилад SAGFiGHTER™ UST;

5 Запропоновано склад технічних засобів по впровадженню способу застосування запропонованого методу виявлення провалів напруг, **що дозволило** виконати економічну оцінку впровадження способу, яка показала короткостроковий термін окупності способу;

6 Наведені в дисертаційній роботі висновки та рекомендації дослідження можуть бути використані при розробці та модернізації енергетичної інфраструктури, сприяючи створенню більш стійких та адаптивних систем енергопостачання.

Одержані наукові результати, а саме: метод та спосіб для виявлення провалів напруги в електричній мережі підприємства впроваджено в КП «Харківські теплові мережі», що підтверджено актами про впровадження від 01.05.2025 р., акт про впровадження від 11.07.2025 р., акт про впровадження від 07.12.2025 р. Результати теоретичного дослідження підтверджуються отриманими результатами експериментального дослідження в межах допустимої розбіжності.

Проведене дослідження є підсумком виконаної роботи, спрямованої на розробку і реалізацію заходів щодо підвищення якості електричної енергії в розподільних мережах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1 Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. М: Энергоатомиздат, 2000. 252 с.

2 Шестеренко, В. Є. (2004). Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств. Підручник. Вінниця: Нова Книга

3 Волошко А.В., В. Шевчук В.В. Ідентифікація та класифікація однофазних провалів напруги за методологією просторового вектору кутової частоти. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2023. № 4, С. 145 – 149. DOI 10.20535/1813-5420.4.2023.290944

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

5 А. В. Волошко і В. В. Шевчук, «ПРОВАЛИ НАПРУГИ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЇХНІХ ХАРАКТЕРИСТИК», Вісник ВПІ, вип. 5, с. 12–17, Жовт. 2023. https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-170-5-12-17

6 IEEE Std 1159-1995. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power. Approved June 1995. IEEE Standards Board. 70 p.

7 IEEE Std 1100-2005. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. Approved 9 December 2005. IEEE-SA Standards Board. 589 p

8 ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160 2010, IDT). [Чинний від 2014-10-01]. К: Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.

9 ДСТУ ISO 9001:2015 Системи управління якістю. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT)

10 IEC 61000-4-30:2015 – Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods.

11 Варецький Ю.О., Пукальський А.М., 2006. АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ НА СИСТЕМУ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ

12 Харченко В. Ф. Електропостачання міст та промислових підприємств: конспект лекцій (для студентів усіх форм навчання галузі знань 14 – Електрична інженерія, спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, професійне спрямування «Електротехнічні системи електроспоживання») / В. Ф. Харченко, О. А. Якунін, В. Г. Воропай ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 238 с.

13 IEEE Guide for Voltage Sag Indices, IEEE Std 1564-2014 Power transmission and distribution networks in general. 2014 DOI:10.1109/IEEESTD.2014.6842577

14 V. A. Skolota & G. S. Zinovev, ”Detecting Voltage Swell, Interruption and Sag,” IEEE 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2018.

15 ITIC (CBEMA) Curve Application Note. Information Technology Industry Council

16 M. V. K. Perera, Control of a Dynamic Voltage Restorer to Compensate Single Phase Voltage Sags, Stockholm University, 2007. 108 p.], [Fitzer, M. Barnes and P. Green, “Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 40, no. 1, pp. 203–212, Jan./Feb. 2004. DOI: 10.1109/TIA.2003.821801

17 V. A. Skolota & G. S. Zinovev, ”Detecting Voltage Swell, Interruption and Sag,” IEEE 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM), 2018

18 J. R. C. Pearanda and G. Ramos, “Characterization of voltage sags due to faults in radial systems using threephase voltage ellipse parameters,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 54, no. 3, pp. 2032 - 2040, 2018

19 J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, F. Blaabjerg, ”Control and testing of a Dynamic Voltage Restorer at medium voltage level,” IEEE transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 3, pp. 806-813, May 2004

20 Суднова В.В. Влияние качества электроэнергии на работу электроприемников Електроний ресурс. Режим доступу: http://www.bt.dn.ua/harm/ .

21 "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)

22 Гриб О. Г., Сендерович Г. А., Щербакова П. Г. Актуальнье задачи определения долевого участия в ответственности за нарушение качества злектрической знергии. Наукові праці ДонНТУ - Електротехніка і енергетика. 2013. №1(14). С. 77-82.

23 Bollen, M. H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press, 2000.

24 IEEE Std 1159-2019. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.

25 IEC 61000-4-30:2015. Electromagnetic Compatibility – Part 4-30: Power Quality Measurement Methods.

26 Bollen, M. H. J. Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions. IEEE Press, 2000

27 Hingorani N. G., Gyugyi L. Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. IEEE Press, 2000

28 Timbus, A., et al. “Voltage Sag Ride-Through Capability of Industrial Induction Motors.” IEEE Transactions on Power Electronics, 2007

29 IEEE Std 1159-1995. IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power. Approved June 1995. IEEE Standards Board. 70 p.

30 IEEE Std 1100-2005. IEEE Recommended Practice for Powering and Grounding Electronic Equipment. Approved 9 December 2005. IEEE-SA Standards Board. 589 p.

31 ДСТУ EN IEC 55014-1:2022 електромагнітна сумісність. Вимоги до побутових приладів, електричних інструментів та подібних пристроїв.

Частина 1. Випромінювання (EN IEC 55014-1:2021, IDT; CISPR 14-1:2020, IDT)

32 ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (EN 50160 2010, IDT). [Чинний від 2014-10-01]. К: Мінекономрозвитку України, 2014. 27 с.

33 Международный стандарт ИСО 9000. Системы менеджмента качества. Основные положения и словарь. 2-е изд. 2000-12-15. ISO — 2000

34 Баталов А.Г., Бородин Д.В., Васильченко В.И., Гриб О.Г., Громадский Ю.С., Довгалюк О.Н., Калюжный Д.Н., Манов И.А., Рожков П.П.,Сендерович Г.А. Качество электрической энергии в системах электроснабжения / А.Г.Баталов, Д.В.Бородин, В.И.Васильченко, О.Г.Гриб, Ю.С.Громадский, О.Н.Довгалюк, Д.Н.Калюжный, И.А.Манов, П.П.Рожков, Г.А.Сендерович. - Харьков: ХНАГХ, 2006. - 272 с.

35 VOLTAGE SAGS: 7 CAUSES & HOW TO AVOID THEM Режим доступу: https://phoenixphaseconverters.com/blogs/news/7-causes-of-voltage-sags-ways-to-avoid-issues

36 Voltage sags and what to do about them Режим доступу: https://www.plantengineering.com/voltage-sags-and-what-to-do-about-them/

37 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.

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

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

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

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

42 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

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

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

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

46 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.

47 Релейний захист та кібербезпека енергетичних систем / Є. І. Сокол, О.Г. Гриб, В.П. Старенький і інші (Підручник / Під загальною редакцією член-кореспондента НАН України, доктора технічних наук,професора Сокола Є.І.). – Харків: ФОП Панов О.М., 2019. – 390 с.

48 Sotnik, O.V. and Sorokin, M.S. (2022). Research of ways to improve the start of the asynchronous motor of an agricultural machine. Engineering of nature management, (1(23), pp. 74 - 80

49 Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр’єва // За ред. д-ра техн. наук, професора В. І. Мілих. Київ: Каравела, 2018. 452 с.

50 Козлов В. Д., Соломаха М. І. Електричні апарати. Модуль 2. Комутаційні апарати низької та середньої напруги: Посібник – К.: НАУ, 2006. – 84 с.

51 В. В. Черкашина і В. М. Баклицький, «ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ З УРАХУВАННЯМ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ», Вісник ВПІ, вип. 1, с. 32–36, Лют. 2024.
DOI: https://doi.org/10.31649/1997-9266-2024-172-1-32-36

52 Як відрегулювати перемикач РПН трансформатора. Інтернет ресурс. Режим доступу:
http://ua.scotech-electrical.com/info/how-to-adjust-the-tap-changer-of-a-transformer-91759227.html

53 Волошко А. В. Провали напруги в електричних мережах та визначення їхніх характеристик [Текст] / А. В. Волошко, В. В. Шевчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2023. – № 5. – С. 12-17.

54 Здорик Н. В. Зниження безпеки струмового перевантаження в електричній мережі / Н. В. Здорик // Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті : матеріали 26-го Міжнар. молодіж. форуму, 19-21 квітня 2022 р. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – Т. 2. – С. 58–59
https://openarchive.nure.ua/handle/document/23599

55 Електричні системи і мережі. Частина 1 : навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 200 с

56 Казанський, С. В. Надійність електроенергетичних систем [Електронний ресурс] : навчальний посібник / С. В. Казанський, Ю. П. Матеєнко, Б. М. Сердюк ; НТУУ «КПІ». – Електронні текстові дані (1 файл: 6,95 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2011. – 216 с.

57 М.С. Сегеда «Електричні мережі та системи». Підручник - Львів. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка»,2007.

58 Dynamic voltage restoration. Електроний ресурс. Режим доступу:
https://en.wikipedia.org/wiki/Dynamic_voltage_restoration?utm_source=chatgpt.com

59 Mitigation of voltage sag and voltage swell by using dynamic voltage restorer El-Zahraa M. Mattar, Ekramy S. Mahmoud, Mohammed Ibrahim El-Sayed / International Journal of Power Electronics and Drive Systems (IJPEDS) Vol. 15, No. 2, June 2024, pp. 1290-1299

DOI: http://doi.org/10.11591/ijpeds.v15.i2.pp1290-1299

60 Suyono, Hadi & Hayusman, Lauhil & Dhofir, M.. (2015). Improvement of voltage sag mitigation using dynamic Voltage Restorer (DVR). 10. 8684-8691

61 Mitigating Voltage Sag and Swell for Improved Power Quality in Non-Linear Load Systems via Series Active Filtering / Komal Harsh, Dr. M. K. Bhaskar, Manish Parihar/ International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRA) ISSN: 2321-9653; Volume 13 Issue VI June 2025- Available at www.ijraset.com

DOI Link: https://doi.org/10.22214/ijraset.2025.72499

62 Sandipak Pandurang Rade A Comparative Study of Voltage Sag & its Mitigation Technique / International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Volume 9, Issue 7, July 2020 . pp 1870-1876

63 He, Mingjun, Yang Wang, Zihong Song, Zhukui Tan, Yongxiang Cai, Xinyu You, Guobo Xie, and Xiaobing Huang. 2025. "Power Quality Mitigation in Modern Distribution Grids: A Comprehensive Review of Emerging Technologies and Future Pathways" Processes 13, no. 8: 2615.

https://doi.org/10.3390/pr13082615

64 Soomro, A. H. 2021. “Dynamic Voltage Restorer–A Comprehensive Review.” ScienceDirect

65 El-Gammal, M. A. 2010. “Dynamic Voltage Restorer (DVR) for Voltage Sag Mitigation.” IJEEI (PDF)

66 Mitigation Voltage Sag Using DVR with Power Distribution Networks (2018) – MATLAB/Simulink. https://cyberleninka.ru/article/n/comparative-performance-analysis-of-dvr-dstatcom-for-distributed-generation-with-gravitational-search-algorithm?utm_source=chatgpt.com "COMPARATIVE PERFORMANCE ANALYSIS OF DVR & ..."

67 Dynamic Voltage Restorer–A comprehensive review (2021) – Soomro A. H. – https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S235248472100809X?utm_source=chatgpt.com "Dynamic Voltage Restorer–A comprehensive review"

68 Network Leveling Based on Voltage-Sag Mitigation Using DVR (2023) – https://www.semanticscholar.org/paper/Comparative-simulation-results-of-DVR-and-D-STATCOM-Minh-Khanh/d77d7f87bce4ddf52f7f4e7f7deb28291da60795?utm_source=chatgpt.com "Comparative simulation results of DVR and D-STATCOM to ..."

69 Kamarposhti, M. A. 2022. “Modeling and Simulation of DVR and D-STATCOM in Presence of Wind Energy System.” ScienceDirect

70 Mitigation of Voltage Sags: A Comparative Study of D-STATCOM and DVR / Progress in Engineering Application and Technology https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/19513?utm_source=chatgpt.com

71 Recent reviews/articles (2024–2025) on control improvements (PSO, ANN, SMC) – https://www.researchgate.net/publication/373349435_A_Literature_Review_on_the_Optimal_Placement_of_Static_Synchronous_Compensator_STATCOM_in_Distribution_Networks?utm_source=chatgpt.com "A Literature Review on the Optimal Placement of Static ..."

72 Modeling and Simulation of DVR and D-STATCOM in Presence of Wind Energy System (2022) – https://www.sciencedirect.com/org/science/article/pii/S1546221822004465?utm_source=chatgpt.com "Modeling and Simulation of DVR and D-STATCOM in ..."

73 M. A. El-Gammal, “Dynamic Voltage Restorer (DVR) for voltage sag mitigation,” *IJEEI* (PDF)

74 Mustafa, A. M. 2023. “Voltage-Sag Mitigation by Stability-Constrained Partitioning.” ,Electric Power Systems Research.

75 Salleh, M. N. 2025. “A Comparative Study of D-STATCOM and DVR.”

76 Tang, L. 2022. “A Review of Voltage Sag Control Measures and Equipment in Distribution Systems.” ScienceDirect

77 Remya, V. K. 2021. “Dynamic Voltage Restorer (DVR) – A Review.” SciSpace.

78 Mumtahina, Umme & Alahakoon, Sanath & Wolfs, Peter. (2023). A Literature Review on the Optimal Placement of Static Synchronous Compensator (STATCOM) in Distribution Networks. Energies. 16. 6122. 10.3390/en16176122.

79 Rajendran, G. 2025. “A Comprehensive Review of Solar PV Integration with Distribution Grids.”

80 Tang, L. 2022. “A Review of Voltage Sag Control Measures and Equipment in Distribution Systems.” ScienceDirect

81 Михайлов В.П. Устройство для компенсации провалов напряжения и отключений в чувствительных элементах электрооборудования (в реле, контроллерах, электро магнитных пускателях, соленоидах) / Промислова електроенергетика та електротехніка, – №1 (121) 2020, С 6-11

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

83 ДБН В.2.5-23:2010 Інженерне обладнання будинків і споруд. Проектування електрообладнання об’єктів цивільного призначення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2010. 104 с.

84 Бурбело М.Й. Розрахунок внутрішнього електропостачання. Вінниця : Вінницький національний технічний університет, 2017. 123 с.

85 Харченко В.Ф. Електропостачання міст і промислових підприємств: Конспект лекцій для студентів 4 - 5 курсів денної і заочної форм навчання напряму підготовки 0906 „Електротехніка” (6.050701 „Електротехніка та електротехнології”) / В.Ф. Харченко; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ, 2011. – 168 с.

86 Кирик В. В. Електричні мережі : підручник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2024. 280 с.

87 Харченко В. Ф. Електропостачання міст та промислових підприємств : конспект лекцій для студентів усіх форм навчання галузі знань 14 «Електрична інженерія» / ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, Кафедра електропостачання. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 152 с.

88 ДБН В. 2.5-23-2003 Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення

89 Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Електропостачання району міста» з курсу «Електропостачання міст і промислових підприємств» (для студентів 5 курсу денної і 6 курсу заочної форм навчання та слухачів 2-ої вищої освіти спеціальності 7.05070103, 8.05070103 «Електротехнічні системи електроспоживання») / Харк. нац. акад. міськ. госп-ва; уклад.: В. Ф. Харченко, В. Г. Воропай, В. М. Гаряжа. – Х.: ХНАМГ, 2013. – 60 с.

90 Ратушняк Г. С., Попова Г. С. Енергозбереження та експлуатація систем теплопостачання : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2002. 120 с.

91 Долгополов І. С. Автоматизація теплових процесів : конспект лекцій для студентів спеціальності 144 «Теплоенергетика» / ДДТУ, Кафедра теплоенергетики. Кам'янське : ДДТУ, 2019. 138 с. .

92 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.

93 ДБН В.2.5-67:2013 "Опалення, вентиляція та кондиціонування"

94 C40 Good Practice Guides: Warsaw - Sustainable Energy Action Plan for Warsaw in the perspective of 2020 Режим доступу: https://www.c40.org/case-studies/c40-good-practice-guides-warsaw-sustainable-energy-action-plan-for-warsaw-in-the-perspective-of-2020/#:~:text=Warsaw's%20district%20heating%20systemxliii%20dates%20back%20to,filterless%20home%20stoves%20still%20widespread%20in%20Poland

95 Колієнко А.Г Регулювання подачі теплоти, як метод підвищення енергоефективності систем теплопостачання в технічних рішеннях для реконструкції системи теплопостачання в м.Бровари за проєктом SUDH. Електроний ресурс Режим доступу: https://auc.org.ua/sites/default/files/regulyuvannya-podachi-teploty_povna_versiya_pdf.pdf

96 КТМ 204 Україна 244-94 Норми та вказівки по нормуванню витрат палива та теплової енергії на опалення житлових та громадських споруд, а також на господарсько-побутові потреби в Україні

97 Наказ від 22.02.2008 № 47 Про затвердження Рекомендацій щодо застосування Методики розрахунку кількості теплоти, спожитої на опалення місць загального користування багатоквартирних будинків, та визначення плати за їх опалення

98 Наказ від 10.04.2018 № 86 Про затвердження Методики визначення технологічних нормативів витрат та втрат гарячої води у системах централізованого постачання гарячої води

99 Наказ від 26.04.2006 № 147 Про затвердження Методичних рекомендацій з розроблення енерго- та екологоефективних схем теплопостачання населених пунктів України

100 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.

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

102 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

103 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

104 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

105 Бокс Дж., Дженкинс Г. Анализ временных рядов. Прогноз и управление. - М.: Мир, 1974. - 197 с.

106 Brillinger, D.R. Time Series: Data Analysis and Theory, 1981 https://books.google.com.ua/books?id=iOdQAAAAMAAJ

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

108 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.

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

110 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.

111 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.pdfва

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

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

114 Главные компоненты временных рядов: метод «Гусеница» / Под. ред. Д.Л. Данилова, А.А. Жиглявского. - СПб: Пресском, 1997. - 307 с.

115 Перелік публікацій по сингулярно-спектральному аналізу (Publications Relating to Singular Spectrum Analysis).

http://www.atmos.ucla.edu/tcd/ssa/ssa-reference.html#ssa_ref_methodology

116 Ghil M., Allen R. M., Dettinger M. D., Ide K., Kondrashov D., Mann M. E., Robertson A., Saunders A., Tian Y., Varadi F., Yiou P.Advanced spectral methods for climatic time series // Rev. Geophys. - 2002. - Vol. 40, №1. - P. 3.1-3.41.

http://www.atmos.ucla.edu/tcd/PREPRINTS/2000RG.pdf

117 Yiou P., Sornette D., Ghil M. Data-Adaptive Wavelets and Multi-Scale Singular-Spectrum Analysis // Physica D. - 2000. - Vol. 142. - P. 254-290

http://www.atmos.ucla.edu/tcd/PREPRINTS/physd254-290.pdf

118 Baratta D., Cicioni G., et al. Application of an ensemble technique based on singular spectrum analysis to daily rainfall forecasting // Neural Networks. - 2003. - Vol. 16. - P. 375-387.

119 Программный продукт Caterpillar

http://www.gistatgroup.com

120 Дороніна М.С. Управління економічними та соціальними процесами підприємства. Монографія. – Харків: Вид. ХДЕУ, 2003. – 444 с.

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

122 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

123 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., Довгалюк О.Н., Щербакова П.Г., Захаренко Н.С.] / Под ред. В.А. Онищенко. – Харьков: ПП «Граф-Ікс», 2013. – 329 с.

124 Оцінки економічних збитків, завданних 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.

ДОДАТКИ

Додаток А Результати замірів показників якості електричної енергії в розподільній мережі

А.1 Підрозділ №1 підприємства теплопостачання

ТаблицяА.1 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "А"

№ п/п	Інтервал часу виміру		Фазна (міжфазна) напруга, кВ	Середнє відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	11:30	12:00	0,2248	2,19	30	0	0
2	12:00	12:30	0,2255	2,51	30	0	0
3	12:30	13:00	0,2242	1,89	30	0	0
4	13:00	13:30	0,2238	1,72	30	0	0
5	13:30	14:00	0,2246	2,11	30	0	0
6	14:00	14:30	0,2248	2,19	30	0	0
7	14:30	15:00	0,2240	1,81	30	0	0
8	15:00	15:30	0,2244	2,02	30	0	0
9	15:30	16:00	0,2252	2,37	30	0	0
10	16:00	16:30	0,2245	2,05	30	0	0
11	16:30	17:00	0,2231	1,39	30	0	0
12	17:00	17:30	0,2231	1,40	30	0	0
13	17:30	18:00	0,2243	1,96	30	0	0
14	18:00	18:30	0,2257	2,60	30	0	0
15	18:30	19:00	0,2247	2,14	30	0	0
16	19:00	19:30	0,2241	1,86	30	0	0
17	19:30	20:00	0,2267	3,05	30	0	0
18	20:00	20:30	0,2280	3,66	30	0	0
19	20:30	21:00	0,2286	3,89	30	0	0
20	21:00	21:30	0,2295	4,33	30	0	0
21	21:30	22:00	0,2304	4,75	30	14	0
22	22:00	22:30	0,2316	5,29	30	30	0
23	22:30	23:00	0,2335	6,16	30	30	0
24	23:00	23:30	0,2361	7,31	30	30	0
25	23:30	00:00	0,2366	7,53	30	30	0
26	00:00	00:30	0,2359	7,23	30	30	0
27	00:30	01:00	0,2366	7,56	30	30	0
28	01:00	01:30	0,2356	7,09	30	30	0
29	01:30	02:00	0,2352	6,90	30	30	0
30	02:00	02:30	0,2342	6,45	30	30	0
31	02:30	03:00	0,2345	6,58	30	30	0
32	03:00	03:30	0,2345	6,60	30	30	0
33	03:30	04:00	0,2345	6,60	30	30	0
34	04:00	04:30	0,2344	6,52	30	30	0
35	04:30	05:00	0,2347	6,67	30	30	0
36	05:00	05:30	0,2328	5,82	30	30	0
37	05:30	06:00	0,2308	4,91	30	21	0
38	06:00	06:30	0,2287	3,94	30	0	0
39	06:30	07:00	0,2285	3,85	30	1	0
40	07:00	07:30	0,2262	2,82	30	0	0
41	07:30	08:00	0,2246	2,09	30	0	0
42	08:00	08:30	0,2229	1,31	30	0	0
43	08:30	09:00	0,2218	0,81	30	0	0
44	09:00	09:30	0,2218	0,81	30	0	0
45	09:30	10:00	0,2203	0,14	30	0	0

Таблиця А.2 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "В"

№ п/п	Інтервал часу виміру		Фазна (міжфазна) напруга, кВ	Середнє відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	11:30	12:00	0,2270	3,20	30	0	0
2	12:00	12:30	0,2289	4,03	30	1	0
3	12:30	13:00	0,2272	3,29	30	0	0
4	13:00	13:30	0,2262	2,82	30	0	0
5	13:30	14:00	0,2271	3,22	30	0	0
6	14:00	14:30	0,2266	3,02	30	0	0
7	14:30	15:00	0,2275	3,39	30	0	0
8	15:00	15:30	0,2298	4,43	30	2	0
9	15:30	16:00	0,2308	4,91	30	18	0
10	16:00	16:30	0,2314	5,17	30	25	0
11	16:30	17:00	0,2303	4,68	30	11	0
12	17:00	17:30	0,2331	5,97	30	30	0
13	17:30	18:00	0,2323	5,61	30	30	0
14	18:00	18:30	0,2328	5,83	30	30	0
15	18:30	19:00	0,2316	5,26	30	18	0
16	19:00	19:30	0,2308	4,93	30	18	0
17	19:30	20:00	0,2307	4,84	30	14	0
18	20:00	20:30	0,2318	5,36	30	30	0
19	20:30	21:00	0,2325	5,67	30	30	0
20	21:00	21:30	0,2342	6,46	30	30	0
21	21:30	22:00	0,2344	6,54	30	30	0
22	22:00	22:30	0,2366	7,55	30	30	0
23	22:30	23:00	0,2386	8,46	30	30	0
24	23:00	23:30	0,2400	9,10	30	30	0
25	23:30	00:00	0,2403	9,25	30	27	3
26	00:00	00:30	0,2396	8,92	30	30	0
27	00:30	01:00	0,2401	9,14	30	30	0
28	01:00	01:30	0,2385	8,40	30	30	0
29	01:30	02:00	0,2380	8,18	30	30	0
30	02:00	02:30	0,2372	7,84	30	30	0
31	02:30	03:00	0,2372	7,83	30	30	0
32	03:00	03:30	0,2374	7,91	30	30	0
33	03:30	04:00	0,2373	7,84	30	30	0
34	04:00	04:30	0,2369	7,68	30	30	0
35	04:30	05:00	0,2367	7,60	30	30	0
36	05:00	05:30	0,2360	7,26	30	30	0
37	05:30	06:00	0,2359	7,25	30	30	0
38	06:00	06:30	0,2339	6,33	30	30	0
39	06:30	07:00	0,2315	5,24	30	23	0
40	07:00	07:30	0,2286	3,93	30	2	0
41	07:30	08:00	0,2278	3,56	30	0	0
42	08:00	08:30	0,2272	3,26	30	0	0
43	08:30	09:00	0,2258	2,62	30	0	0
44	09:00	09:30	0,2264	2,90	30	0	0
45	09:30	10:00	0,2266	3,02	30	0	0

Таблиця А.3 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "С"

№ п/п	Інтервал часу виміру		Фазна (міжфазна) напруга, кВ	Середнє відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	11:30	12:00	0,2347	6,67	30	30	0
2	12:00	12:30	0,2340	6,36	30	30	0
3	12:30	13:00	0,2319	5,43	30	30	0
4	13:00	13:30	0,2316	5,29	30	30	0
5	13:30	14:00	0,2327	5,77	30	30	0
6	14:00	14:30	0,2328	5,81	30	30	0
7	14:30	15:00	0,2321	5,50	30	30	0
8	15:00	15:30	0,2325	5,66	30	30	0
9	15:30	16:00	0,2314	5,17	30	30	0
10	16:00	16:30	0,2309	4,97	30	30	0
11	16:30	17:00	0,2301	4,61	30	11	0
12	17:00	17:30	0,2295	4,32	30	0	0
13	17:30	18:00	0,2299	4,51	30	8	0
14	18:00	18:30	0,2316	5,27	30	30	0
15	18:30	19:00	0,2308	4,90	30	18	0
16	19:00	19:30	0,2297	4,43	30	5	0
17	19:30	20:00	0,2310	5,00	30	21	0
18	20:00	20:30	0,2318	5,38	30	30	0
19	20:30	21:00	0,2330	5,89	30	30	0
20	21:00	21:30	0,2331	5,95	30	30	0
21	21:30	22:00	0,2336	6,18	30	30	0
22	22:00	22:30	0,2338	6,29	30	30	0
23	22:30	23:00	0,2351	6,86	30	30	0
24	23:00	23:30	0,2374	7,93	30	30	0
25	23:30	00:00	0,2382	8,26	30	30	0
26	00:00	00:30	0,2381	8,21	30	30	0
27	00:30	01:00	0,2385	8,42	30	30	0
28	01:00	01:30	0,2371	7,79	30	30	0
29	01:30	02:00	0,2361	7,30	30	30	0
30	02:00	02:30	0,2355	7,05	30	30	0
31	02:30	03:00	0,2354	7,02	30	30	0
32	03:00	03:30	0,2354	7,02	30	30	0
33	03:30	04:00	0,2353	6,96	30	30	0
34	04:00	04:30	0,2351	6,87	30	30	0
35	04:30	05:00	0,2354	6,99	30	30	0
36	05:00	05:30	0,2345	6,59	30	30	0
37	05:30	06:00	0,2350	6,83	30	30	0
38	06:00	06:30	0,2344	6,55	30	30	0
39	06:30	07:00	0,2337	6,23	30	30	0
40	07:00	07:30	0,2333	6,03	30	30	0
41	07:30	08:00	0,2326	5,71	30	30	0
42	08:00	08:30	0,2301	4,60	30	5	0
43	08:30	09:00	0,2296	4,36	30	1	0
44	09:00	09:30	0,2293	4,22	30	0	0
45	09:30	10:00	0,2263	2,88	30	0	0

Рисунок А.1 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "А" з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

Рисунок А.2 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "В" з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

Рисунок А.3 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "С" з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

Таблиця А.4 – Відхилення напруги, що встановилося по прямій послідовності

№ п/п	Інтервал часу виміру		Напруга прямої послідовності, кВ	Среднее відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	11:30	12:00	0,23	4,28	30	0	0
2	12:00	12:30	0,23	4,56	30	0	0
3	12:30	13:00	0,23	3,80	30	0	0
4	13:00	13:30	0,23	3,54	30	0	0
5	13:30	14:00	0,23	3,96	30	0	0
6	14:00	14:30	0,23	3,94	30	0	0
7	14:30	15:00	0,23	3,83	30	0	0
8	15:00	15:30	0,23	4,31	30	0	0
9	15:30	16:00	0,23	4,42	30	0	0
10	16:00	16:30	0,23	4,33	30	0	0
11	16:30	17:00	0,23	3,83	30	0	0
12	17:00	17:30	0,23	4,16	30	0	0
13	17:30	18:00	0,23	4,29	30	0	0
14	18:00	18:30	0,23	4,84	30	0	0
15	18:30	19:00	0,23	4,37	30	12	0
16	19:00	19:30	0,23	4,01	30	0	0
17	19:30	20:00	0,23	4,57	30	8	0
18	20:00	20:30	0,23	5,07	30	25	0
19	20:30	21:00	0,23	5,43	30	30	0
20	21:00	21:30	0,23	5,86	30	30	0
21	21:30	22:00	0,23	6,10	30	30	0
22	22:00	22:30	0,23	6,66	30	30	0
23	22:30	23:00	0,24	7,45	30	30	0
24	23:00	23:30	0,24	8,41	30	30	0
25	23:30	00:00	0,24	8,64	30	30	0
26	00:00	00:30	0,24	8,41	30	30	0
27	00:30	01:00	0,24	8,67	30	30	0
28	01:00	01:30	0,24	8,05	30	30	0
29	01:30	02:00	0,24	7,75	30	30	0
30	02:00	02:30	0,24	7,41	30	30	0
31	02:30	03:00	0,24	7,43	30	30	0
32	03:00	03:30	0,24	7,47	30	30	0
33	03:30	04:00	0,24	7,43	30	30	0
34	04:00	04:30	0,24	7,31	30	30	0
35	04:30	05:00	0,24	7,38	30	30	0
36	05:00	05:30	0,24	6,85	30	30	0
37	05:30	06:00	0,23	6,61	30	30	0
38	06:00	06:30	0,23	5,88	30	30	0
39	06:30	07:00	0,23	5,39	30	28	0
40	07:00	07:30	0,23	4,53	30	0	0
41	07:30	08:00	0,23	4,05	30	0	0
42	08:00	08:30	0,23	3,32	30	0	0
43	08:30	09:00	0,23	2,86	30	0	0
44	09:00	09:30	0,23	2,91	30	0	0
45	09:30	10:00	0,23	2,28	30	0	0

Рисунок А.4 – Відхилення напруги, що встановилося, по прямій послідовності. Протокол замірів на ввідному пристрої підрозділу №1 підприємства теплопостачання з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

Таблиця А.5 – Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності. Протокол замірів на ввідному пристрої підрозділу №1 підприємства теплопостачання з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

№ п/п	Інтервал часу виміру		Коефіцієнт несиметрії KU2ср, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець				
1	11:30	12:00	0,24	600	0	0
2	12:00	12:30	0,22	600	0	0
3	12:30	13:00	0,21	600	0	0
4	13:00	13:30	0,17	600	0	0
5	13:30	14:00	0,29	600	0	0
6	14:00	14:30	0,27	600	0	0
7	14:30	15:00	0,25	599	0	0
8	15:00	15:30	0,20	600	0	0
9	15:30	16:00	0,19	600	0	0
10	16:00	16:30	0,16	600	0	0
11	16:30	17:00	0,13	600	0	0
12	17:00	17:30	0,18	600	0	0
13	17:30	18:00	0,10	600	0	0
14	18:00	18:30	0,07	600	0	0
15	18:30	19:00	0,06	600	0	0
16	19:00	19:30	0,08	600	0	0
17	19:30	20:00	0,09	600	0	0
18	20:00	20:30	0,16	600	0	0

Продовження таблиці А.5

1	2	3	4	5	6	7
19	20:30	21:00	0,16	600	0	0
20	21:00	21:30	0,21	600	0	0
21	21:30	22:00	0,26	600	0	0
22	22:00	22:30	0,18	600	0	0
23	22:30	23:00	0,17	600	0	0
24	23:00	23:30	0,24	600	0	0
25	23:30	00:00	0,29	600	0	0
26	00:00	00:30	0,25	600	0	0
27	00:30	01:00	0,28	601	0	0
28	01:00	01:30	0,27	600	0	0
29	01:30	02:00	0,30	600	0	0
30	02:00	02:30	0,29	600	0	0
31	02:30	03:00	0,31	600	0	0
32	03:00	03:30	0,34	600	0	0
33	03:30	04:00	0,34	600	0	0
34	04:00	04:30	0,35	600	0	0
35	04:30	05:00	0,32	600	0	0
36	05:00	05:30	0,30	600	0	0
37	05:30	06:00	0,24	600	0	0
38	06:00	06:30	0,23	600	0	0
39	06:30	07:00	0,22	600	0	0
40	07:00	07:30	0,30	600	0	0
41	07:30	08:00	0,28	600	0	0
42	08:00	08:30	0,34	600	0	0
43	08:30	09:00	0,26	600	0	0
44	09:00	09:30	0,19	600	0	0
45	09:30	10:00	0,11	600	0	0

Рисунок А.5 – Графік коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

Таблиця А.6 – Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю. Протокол замірів на ввідному пристрої підрозділу №1 підприємства теплопостачання з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

№ п/п	Інтервал часу виміру		Коефіцієнт несиметрії KU0ср, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець				
1	11:30	12:00	2,96	600	594	0
2	12:00	12:30	2,47	600	569	0
3	12:30	13:00	2,26	600	553	0
4	13:00	13:30	2,29	600	529	0
5	13:30	14:00	2,32	600	589	0
6	14:00	14:30	2,38	600	600	0
7	14:30	15:00	2,39	599	592	0
8	15:00	15:30	2,34	600	600	0
9	15:30	16:00	1,96	600	291	0
10	16:00	16:30	2,08	600	357	0
11	16:30	17:00	2,28	600	600	0
12	17:00	17:30	2,83	600	600	0
13	17:30	18:00	2,24	600	354	0
14	18:00	18:30	2,05	600	476	0
15	18:30	19:00	1,99	600	226	0
16	19:00	19:30	1,92	600	254	0

Продовження таблиці А.6

1	2	3	4	5	6	7
17	19:30	20:00	1,32	600	0	0
18	20:00	20:30	1,23	600	0	0
19	20:30	21:00	1,38	600	0	0
20	21:00	21:30	1,29	600	0	0
21	21:30	22:00	1,09	600	0	0
22	22:00	22:30	1,19	600	0	0
23	22:30	23:00	1,25	600	0	0
24	23:00	23:30	0,89	600	0	0
25	23:30	00:00	0,86	600	0	0
26	00:00	00:30	0,91	600	0	0
27	00:30	01:00	0,85	601	0	0
28	01:00	01:30	0,69	600	0	0
29	01:30	02:00	0,64	600	0	0
30	02:00	02:30	0,69	600	0	0
31	02:30	03:00	0,55	600	0	0
32	03:00	03:30	0,60	600	0	0
33	03:30	04:00	0,56	600	0	0
34	04:00	04:30	0,53	600	0	0
35	04:30	05:00	0,44	600	0	0
36	05:00	05:30	0,74	600	0	0
37	05:30	06:00	1,48	600	2	0
38	06:00	06:30	1,84	600	98	0
39	06:30	07:00	1,60	600	43	0
40	07:00	07:30	2,19	600	367	0
41	07:30	08:00	2,43	600	509	0
42	08:00	08:30	2,24	600	532	0
43	08:30	09:00	2,30	600	492	0
44	09:00	09:30	2,17	600	480	0
45	09:30	10:00	1,92	600	199	0

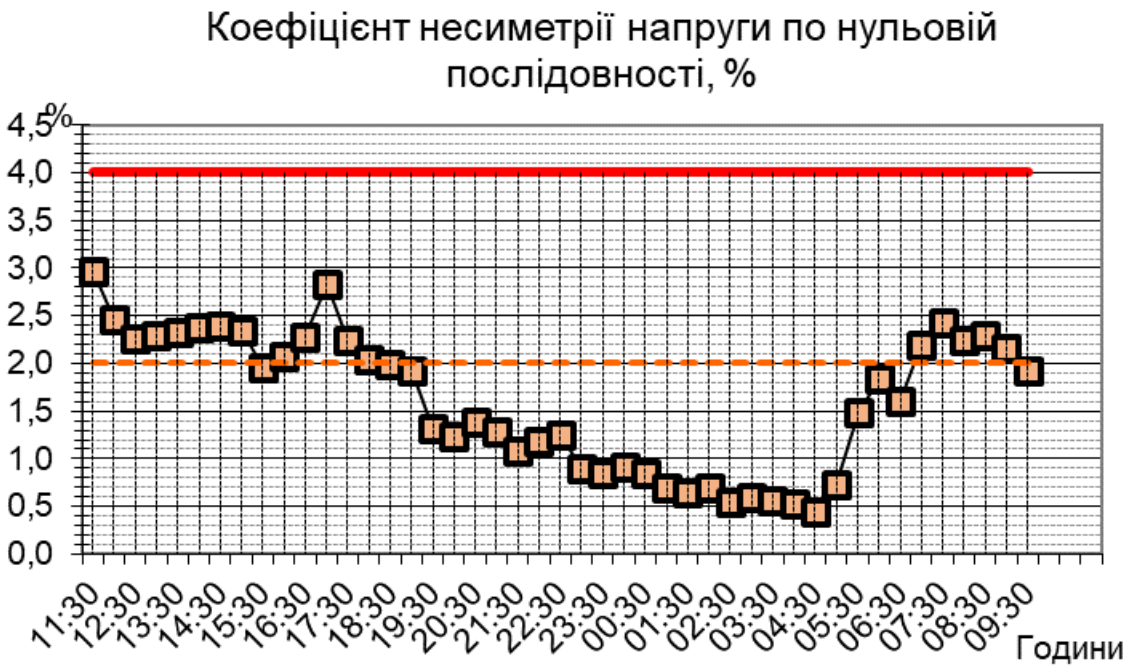


Рисунок А.6 – Графік коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю з 09.11.2020 11:30 по 10.11.2020 10:00

Рисунок А.7 – Середній коефіцієнт n-ї гармонічної складової напруги у фазах "A", "B", "C", %

Таблиця А.7 – Журнал подій та виходів ПЯЕЕ за нормально та гранично допустимі значення. Журнал перенапруги

№ п/п	час	Подія	Фаза	Уставка, %	Пікове значення, %	Тривалість, с
1	11:26	СТАРТ ВИМІРЮВАНЬ				
156	14:53	Перенапруга	A	110	113,75	0,02
645	23:07	Перенапруга	B	110	111,34	0,01
658	23:19	Перенапруга	B	110	111,16	0,01
684	23:35	Перенапруга	B	110	110,03	0,01
697	23:38	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
698	23:38	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
699	23:38	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
700	23:38	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
701	23:38	Перенапруга	B	110	110	0,01
702	23:38	Перенапруга	B	110	110,03	0,01
703	23:38	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
704	23:38	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
705	23:38	Перенапруга	B	110	110	0,01
706	23:38	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
707	23:38	Перенапруга	B	110	110,05	0,03
708	23:39	Перенапруга	B	110	110,06	0,01
713	23:39	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
714	23:39	Перенапруга	B	110	110,03	0,01
715	23:39	Перенапруга	B	110	110	0,01
716	23:39	Перенапруга	B	110	110	0,01
717	23:39	Перенапруга	B	110	110,05	0,02
718	23:39	Перенапруга	B	110	110,03	0,01
719	23:39	Перенапруга	B	110	110,03	0,02
720	23:39	Перенапруга	B	110	110	0,01
721	23:39	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
722	23:39	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
723	23:39	Перенапруга	B	110	110,08	0,01
724	23:39	Перенапруга	B	110	110,07	0,01
725	23:39	Перенапруга	B	110	110,15	0,51
726	23:39	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
727	23:39	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
728	23:39	Перенапруга	B	110	110,08	0,06
729	23:39	Перенапруга	B	110	110,07	0,01
730	23:39	Перенапруга	B	110	110,03	0,01
731	23:39	Перенапруга	B	110	110,09	0,01

№ п/п	час	Подія	Фаза	Уставка, %	Пікове значення, %	Тривалість, с
732	23:40	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
737	23:40	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
738	23:40	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
739	23:40	Перенапруга	B	110	110	0,01
740	23:40	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
741	23:40	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
742	23:40	Перенапруга	B	110	110,04	0,01
743	23:40	Перенапруга	B	110	110,04	0,01
744	23:40	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
745	23:40	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
746	23:40	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
747	23:40	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
748	23:40	Перенапруга	B	110	110	0,01
749	23:40	Перенапруга	B	110	110	0,01
750	23:40	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
751	23:40	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
752	23:40	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
753	23:40	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
754	23:40	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
755	23:40	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
756	23:41	Перенапруга	B	110	110,08	0,01
757	23:41	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
758	23:41	Перенапруга	B	110	110,26	0,81
759	23:41	Перенапруга	B	110	110,06	0,05
760	23:41	Перенапруга	B	110	110,03	0,01
761	23:41	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
762	23:41	Перенапруга	B	110	110,14	0,09
763	23:41	Перенапруга	B	110	110,18	0,49
764	23:41	Перенапруга	B	110	110,27	1,59
765	23:41	Перенапруга	B	110	110,2	0,13
766	23:41	Перенапруга	B	110	110,19	0,31
767	23:41	Перенапруга	B	110	110,2	0,43
768	23:41	Перенапруга	B	110	110,18	0,93
769	23:41	Перенапруга	B	110	110,24	4,33
770	23:41	Перенапруга	B	110	110,24	1,01
771	23:41	Перенапруга	B	110	110,21	2,55
772	23:41	Перенапруга	B	110	110,21	0,83
773	23:41	Перенапруга	B	110	110,27	5,95
774	23:41	Перенапруга	B	110	110,28	0,71
775	23:42	Перенапруга	B	110	110,25	3,37
776	23:42	Перенапруга	B	110	110,27	2,41

№ п/п	час	Подія	Фаза	Уставка, %	Пікове значення, %	Тривалість, с
777	23:42	Перенапруга	B	110	110,27	3,15
778	23:42	Перенапруга	B	110	110,12	0,07
779	23:42	Перенапруга	B	110	110,15	0,03
780	23:42	Перенапруга	B	110	110,18	0,99
781	23:42	Перенапруга	B	110	110,21	1,99
782	23:42	Перенапруга	B	110	110,18	0,91
783	23:42	Перенапруга	B	110	110,12	0,11
784	23:42	Перенапруга	B	110	110,11	0,07
785	23:42	Перенапруга	B	110	110,09	0,03
786	23:42	Перенапруга	B	110	110,21	1,63
787	23:42	Перенапруга	B	110	110,22	6,07
788	23:42	Перенапруга	B	110	110,2	4,57
789	23:42	Перенапруга	B	110	110,24	7,75
790	23:42	Перенапруга	B	110	110,17	0,93
791	23:43	Перенапруга	B	110	110,25	13,31
792	23:43	Перенапруга	B	110	110,14	0,09
793	23:43	Перенапруга	B	110	110,31	6,05
794	23:43	Перенапруга	B	110	110,21	2,6
795	23:43	Перенапруга	B	110	110,15	0,33
796	23:43	Перенапруга	B	110	110,04	0,01
797	23:43	Перенапруга	B	110	110,05	0,07
798	23:43	Перенапруга	B	110	110,14	0,11
799	23:43	Перенапруга	B	110	110,03	0,01
800	23:43	Перенапруга	B	110	110,06	0,05
801	23:43	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
802	23:43	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
803	23:43	Перенапруга	B	110	110,05	0,03
804	23:43	Перенапруга	B	110	110,04	0,01
805	23:43	Перенапруга	B	110	110,08	0,07
806	23:44	Перенапруга	B	110	110,19	0,89
807	23:44	Перенапруга	B	110	110,18	0,27
808	23:44	Перенапруга	B	110	110,21	2,41
809	23:44	Перенапруга	B	110	110,15	1,41
810	23:44	Перенапруга	B	110	110	0,01
811	23:44	Перенапруга	B	110	110	0,01
812	23:44	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
813	23:44	Перенапруга	B	110	110,12	0,09
814	23:44	Перенапруга	B	110	110,12	0,19
815	23:44	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
816	23:44	Перенапруга	B	110	110,05	0,01
817	23:44	Перенапруга	B	110	110,14	0,17

№ п/п	час	Подія	Фаза	Уставка, %	Пікове значення, %	Тривалість, с
818	23:44	Перенапруга	B	110	110,12	0,07
819	23:44	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
820	23:44	Перенапруга	B	110	110	0,01
821	23:44	Перенапруга	B	110	110	0,01
822	23:44	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
823	23:44	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
824	23:44	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
825	23:45	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
826	23:45	Перенапруга	B	110	110	0,01
827	23:45	Перенапруга	B	110	110	0,01
828	23:46	Перенапруга	B	110	110	0,01
829	23:46	Перенапруга	B	110	110	0,01
830	23:46	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
831	23:46	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
832	23:47	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
833	23:47	Перенапруга	B	110	110	0,01
834	23:47	Перенапруга	B	110	110	0,01
835	23:47	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
836	23:48	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
837	23:48	Перенапруга	B	110	110	0,01
838	23:48	Перенапруга	B	110	110	0,01
839	23:48	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
840	23:48	Перенапруга	B	110	110	0,01
841	23:48	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
842	23:48	Перенапруга	B	110	110,02	0,01
843	23:49	Перенапруга	B	110	110,01	0,01
844	23:49	Перенапруга	B	110	110	0,01
845	23:49	Перенапруга	B	110	110	0,01
1500	10:00	ЗАПИС СТАТИСТИКИ				

Таблиця А.8 – Журнал подій та виходів ПЯЕЕ за нормально та гранично допустимі значення. Журнал перенапруги, подія «Перевищення уставки» (Фрагмент)

№ п/п	Дата і час	Подія	Інформація
1	09.11.2020 11:26	СТАРТ ВИМІРЮВАНЬ	Вхід напруги: 220 В
			Вхід струму - ТРАНСФОРМАТОР
			ТИП підключення - 3 ФАЗИ U
			Збір статистики Увімкнено
			Період усереднення: 30 МІН
			Масштаб по напрузі: 1.00
			Масштаб по струму: 1.00
2	09.11.2020 11:27	Перевищення уставки	Відхилення напруги, %
			Фаза: B
			Пікове значення (%): 5.89
			Уставка (%): 5.00
3	09.11.2020 11:27	Перевищення уставки	Відхилення U прямої послідовності,%
			Пікове значення (%): -99.82
			Уставка (%) (ПД): -10.00
4	09.11.2020 11:27	Перевищення уставки	Коефіцієнт гармоніки 16
			Фаза: C
			Пікове значення (%): 0.22
			Уставка (%): 0.20
5	09.11.2020 11:27	Перевищення уставки	Коефіцієнт гармоніки 20
			Фаза: C
			Пікове значення (%): 0.24
			Уставка (%): 0.20

Розрив таблиці (випадки «Перевищення уставки» загальна кількість 1305)

1495	10.11.2020 08:41	Перевищення уставки	Відхилення напруги, %
			Фаза: C
			Пікове значення (%): 5.28
			Уставка (%): 5.00
1496	10.11.2020 09:00	ЗАПИС СТАТИСТИКИ	
1497	10.11.2020 09:00	Перевищення уставки	Коефіцієнт нульової послідовності, %
			Фази: A,B,C
			Пікове значення (%): 2.02
			Уставка (%): 2.00
1498	10.11.2020 09:30	ЗАПИС СТАТИСТИКИ	
1499	10.11.2020 09:30	Перевищення уставки	Коефіцієнт нульової послідовності, %
			Фази: A,B,C
			Пікове значення (%): 2.33
			Уставка (%): 2.00
1500	10.11.2020 10:00	ЗАПИС СТАТИСТИКИ	

А.2 Підрозділ №2 підприємства теплопостачання

Таблиця А.9 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "А"

№ п/п	Інтервал часу виміру		Фазна (міжфазна) напруга, кВ	Середнє відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	12:00	12:30	0,2382	8,29	30	30	0
2	12:30	13:00	0,2393	8,79	30	28	2
3	13:00	13:30	0,2386	8,44	30	30	0
4	13:30	14:00	0,2366	7,56	30	30	0
5	14:00	14:30	0,2366	7,55	30	30	0
6	14:30	15:00	0,2368	7,62	30	30	0
7	15:00	15:30	0,2375	7,97	30	30	0
8	15:30	16:00	0,2384	8,35	30	30	0
9	16:00	16:30	0,2397	8,95	30	28	2
10	16:30	17:00	0,2388	8,55	30	30	0
11	17:00	17:30	0,2397	8,95	30	30	0
12	17:30	18:00	0,2398	9,00	30	30	0
13	18:00	18:30	0,2424	10,16	30	12	18
14	18:30	19:00	0,2411	9,59	30	17	13
15	19:00	19:30	0,2432	10,56	30	2	28
16	19:30	20:00	0,2426	10,27	30	1	29
17	20:00	20:30	0,2425	10,23	30	6	24
18	20:30	21:00	0,2433	10,61	30	1	29
19	21:00	21:30	0,2425	10,22	30	0	30
20	21:30	22:00	0,2431	10,51	30	0	30
21	22:00	22:30	0,2438	10,84	30	1	29
22	22:30	23:00	0,2424	10,20	30	7	23
23	23:00	23:30	0,2429	10,42	30	0	30
24	23:30	00:00	0,2443	11,06	30	0	30
25	00:00	00:30	0,2445	11,13	30	0	30
26	00:30	01:00	0,2440	10,93	30	0	30
27	01:00	01:30	0,2444	11,08	30	0	30
28	01:30	02:00	0,2445	11,14	30	0	30
29	02:00	02:30	0,2451	11,41	30	0	30
30	02:30	03:00	0,2453	11,49	30	0	30
31	03:00	03:30	0,2446	11,16	30	0	30
32	03:30	04:00	0,2447	11,21	30	0	30
33	04:00	04:30	0,2448	11,29	30	0	30
34	04:30	05:00	0,2447	11,25	30	0	30
35	05:00	05:30	0,2444	11,07	30	0	30
36	05:30	06:00	0,2438	10,82	30	0	30
37	06:00	06:30	0,2429	10,42	30	5	25
38	06:30	07:00	0,2424	10,16	30	4	26
39	07:00	07:30	0,2439	10,85	30	0	30
40	07:30	08:00	0,2422	10,11	30	5	25
41	08:00	08:30	0,2427	10,32	30	4	26
42	08:30	09:00	0,2406	9,37	30	24	6
43	09:00	09:30	0,2399	9,06	30	27	3
44	09:30	10:00	0,2397	8,95	30	25	5
45	10:00	10:30	0,2390	8,66	30	30	0
46	10:30	11:00	0,2385	8,39	30	30	0
47	11:00	11:30	0,2389	8,59	30	30	0
48	11:30	12:00	0,24	9,44	30	21	9

Таблиця А.10 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "В"

№ п/п	Інтервал часу виміру		Фазна (міжфазна) напруга, кВ	Середнє відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	12:00	12:30	0,2348	6,71	30	30	0
2	12:30	13:00	0,2344	6,56	30	30	0
3	13:00	13:30	0,2341	6,39	30	30	0
4	13:30	14:00	0,2341	6,39	30	30	0
5	14:00	14:30	0,2341	6,42	30	30	0
6	14:30	15:00	0,2340	6,36	30	30	0
7	15:00	15:30	0,2341	6,43	30	30	0
8	15:30	16:00	0,2334	6,09	30	30	0
9	16:00	16:30	0,2329	5,85	30	30	0
10	16:30	17:00	0,2319	5,40	30	30	0
11	17:00	17:30	0,2334	6,11	30	30	0
12	17:30	18:00	0,2329	5,87	30	30	0
13	18:00	18:30	0,2329	5,86	30	30	0
14	18:30	19:00	0,2338	6,28	30	30	0
15	19:00	19:30	0,2334	6,08	30	30	0
16	19:30	20:00	0,2345	6,58	30	30	0
17	20:00	20:30	0,2350	6,80	30	30	0
18	20:30	21:00	0,2352	6,89	30	30	0
19	21:00	21:30	0,2359	7,23	30	30	0
20	21:30	22:00	0,2365	7,51	30	30	0
21	22:00	22:30	0,2369	7,66	30	30	0
22	22:30	23:00	0,2388	8,55	30	30	0
23	23:00	23:30	0,2395	8,86	30	30	0
24	23:30	00:00	0,2406	9,36	30	29	1
25	00:00	00:30	0,2411	9,58	30	17	13
26	00:30	01:00	0,2413	9,67	30	19	11
27	01:00	01:30	0,2411	9,59	30	17	13
28	01:30	02:00	0,2416	9,81	30	13	17
29	02:00	02:30	0,2420	9,98	30	3	27
30	02:30	03:00	0,2422	10,07	30	4	26
31	03:00	03:30	0,2423	10,15	30	4	26
32	03:30	04:00	0,2422	10,08	30	1	29
33	04:00	04:30	0,2422	10,09	30	2	28
34	04:30	05:00	0,2418	9,90	30	6	24
35	05:00	05:30	0,2418	9,90	30	9	21
36	05:30	06:00	0,2407	9,43	30	24	6
37	06:00	06:30	0,2402	9,20	30	25	5
38	06:30	07:00	0,2396	8,89	30	29	1
39	07:00	07:30	0,2396	8,92	30	30	0
40	07:30	08:00	0,2385	8,41	30	30	0
41	08:00	08:30	0,2376	7,99	30	30	0
42	08:30	09:00	0,2367	7,59	30	30	0
43	09:00	09:30	0,2361	7,31	30	30	0
44	09:30	10:00	0,2357	7,13	30	30	0
45	10:00	10:30	0,2354	6,98	30	30	0
46	10:30	11:00	0,2360	7,28	30	30	0
47	11:00	11:30	0,2366	7,53	30	30	0
48	11:30	12:00	0,24	7,64	30	30	0

Таблиця А.11 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "С"

№ п/п	Інтервал часу виміру		Фазна (міжфазна) напруга, кВ	Середнє відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	12:00	12:30	0,2312	5,08	30	23	0
2	12:30	13:00	0,2295	4,33	30	6	0
3	13:00	13:30	0,2302	4,62	30	15	0
4	13:30	14:00	0,2310	5,00	30	22	0
5	14:00	14:30	0,2299	4,52	30	11	0
6	14:30	15:00	0,2294	4,28	30	8	0
7	15:00	15:30	0,2291	4,12	30	0	0
8	15:30	16:00	0,2286	3,92	30	0	0
9	16:00	16:30	0,2278	3,55	30	0	0
10	16:30	17:00	0,2274	3,38	30	0	0
11	17:00	17:30	0,2294	4,25	30	4	0
12	17:30	18:00	0,2296	4,36	30	5	0
13	18:00	18:30	0,2283	3,75	30	6	0
14	18:30	19:00	0,2300	4,57	30	11	0
15	19:00	19:30	0,2293	4,22	30	3	0
16	19:30	20:00	0,2306	4,83	30	20	0
17	20:00	20:30	0,2316	5,29	30	22	0
18	20:30	21:00	0,2314	5,19	30	30	0
19	21:00	21:30	0,2322	5,56	30	30	0
20	21:30	22:00	0,2324	5,64	30	30	0
21	22:00	22:30	0,2336	6,17	30	30	0
22	22:30	23:00	0,2356	7,07	30	30	0
23	23:00	23:30	0,2371	7,76	30	30	0
24	23:30	00:00	0,2372	7,81	30	30	0
25	00:00	00:30	0,2370	7,73	30	30	0
26	00:30	01:00	0,2374	7,89	30	30	0
27	01:00	01:30	0,2381	8,21	30	30	0
28	01:30	02:00	0,2383	8,33	30	30	0
29	02:00	02:30	0,2385	8,39	30	30	0
30	02:30	03:00	0,2387	8,48	30	30	0
31	03:00	03:30	0,2391	8,67	30	30	0
32	03:30	04:00	0,2386	8,45	30	30	0
33	04:00	04:30	0,2385	8,40	30	30	0
34	04:30	05:00	0,2390	8,65	30	30	0
35	05:00	05:30	0,2376	8,00	30	30	0
36	05:30	06:00	0,2370	7,71	30	30	0
37	06:00	06:30	0,2358	7,19	30	30	0
38	06:30	07:00	0,2353	6,94	30	30	0
39	07:00	07:30	0,2349	6,75	30	30	0
40	07:30	08:00	0,2368	7,63	30	30	0
41	08:00	08:30	0,2341	6,43	30	30	0
42	08:30	09:00	0,2342	6,43	30	30	0
43	09:00	09:30	0,2334	6,09	30	30	0
44	09:30	10:00	0,2331	5,96	30	30	0
45	10:00	10:30	0,2331	5,94	30	30	0
46	10:30	11:00	0,2337	6,23	30	30	0
47	11:00	11:30	0,2347	6,68	30	30	0
48	11:30	12:00	0,23	6,39	30	30	0

Рисунок А.8 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "А" з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

Рисунок А.9 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "В" з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

Рисунок А.10 – Відхилення напруги, що встановилося, у фазі "С" з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

Таблиця А.12 – Відхилення напруги, що встановилося по прямій послідовності

№ п/п	Інтервал часу виміру		Фазна (міжфазна) напруга, кВ	Середнє відхилення напруги, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець					
1	12:00	12:30	0,24	6,96	30	30	0
2	12:30	13:00	0,23	6,82	30	30	0
3	13:00	13:30	0,23	6,74	30	30	0
4	13:30	14:00	0,23	6,59	30	30	0
5	14:00	14:30	0,23	6,43	30	30	0
6	14:30	15:00	0,23	6,36	30	30	0
7	15:00	15:30	0,23	6,44	30	30	0
8	15:30	16:00	0,23	6,38	30	30	0
9	16:00	16:30	0,23	6,37	30	30	0
10	16:30	17:00	0,23	6,04	30	30	0
11	17:00	17:30	0,23	6,70	30	30	0
12	17:30	18:00	0,23	6,67	30	30	0
13	18:00	18:30	0,24	6,83	30	30	0
14	18:30	19:00	0,24	7,06	30	30	0
15	19:00	19:30	0,24	7,19	30	30	0
16	19:30	20:00	0,24	7,47	30	30	0
17	20:00	20:30	0,24	7,69	30	30	0
18	20:30	21:00	0,24	7,81	30	30	0
19	21:00	21:30	0,24	7,93	30	30	0
20	21:30	22:00	0,24	8,15	30	30	0
21	22:00	22:30	0,24	8,48	30	30	0
22	22:30	23:00	0,24	8,88	30	30	0
23	23:00	23:30	0,24	9,29	30	30	0
24	23:30	00:00	0,24	9,68	30	30	0
25	00:00	00:30	0,24	9,76	30	29	1
26	00:30	01:00	0,24	9,78	30	30	0
27	01:00	01:30	0,24	9,91	30	26	4
28	01:30	02:00	0,24	10,04	30	10	20
29	02:00	02:30	0,24	10,21	30	0	30
30	02:30	03:00	0,24	10,29	30	0	30
31	03:00	03:30	0,24	10,28	30	0	30
32	03:30	04:00	0,24	10,20	30	0	30
33	04:00	04:30	0,24	10,21	30	0	30
34	04:30	05:00	0,24	10,22	30	0	30
35	05:00	05:30	0,24	9,94	30	20	10
36	05:30	06:00	0,24	9,60	30	30	0
37	06:00	06:30	0,24	9,22	30	30	0
38	06:30	07:00	0,24	8,95	30	30	0
39	07:00	07:30	0,24	9,11	30	30	0
40	07:30	08:00	0,24	8,99	30	30	0
41	08:00	08:30	0,24	8,52	30	30	0
42	08:30	09:00	0,24	8,07	30	30	0
43	09:00	09:30	0,24	7,76	30	30	0
44	09:30	10:00	0,24	7,62	30	30	0
45	10:00	10:30	0,24	7,47	30	30	0
46	10:30	11:00	0,24	7,58	30	30	0
47	11:00	11:30	0,24	7,88	30	30	0
48	11:30	12:00	0,24	8,10	30	30	0

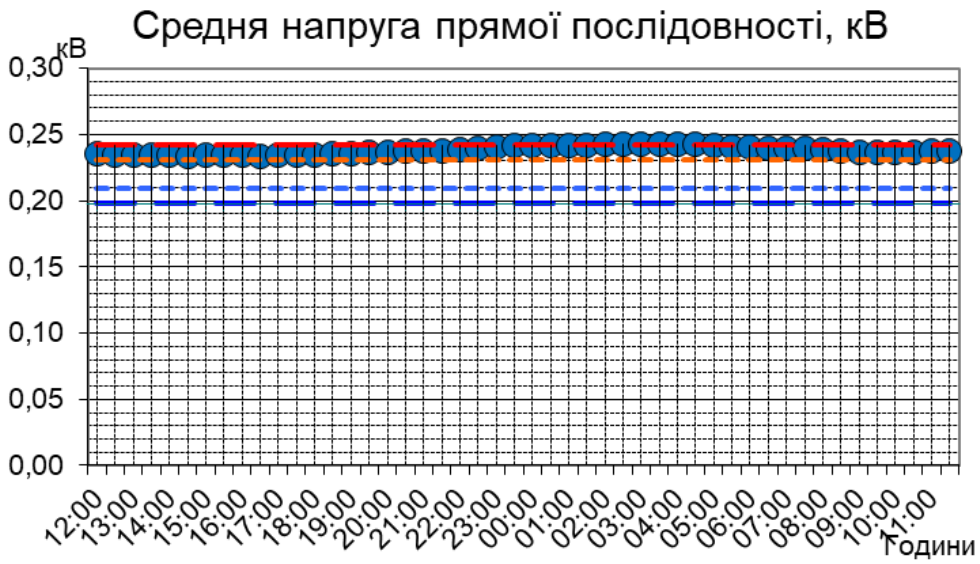


Рисунок А.11 – Відхилення напруги, що встановилося, по прямій послідовності. Протокол замірів на ввідному пристрої підрозділу №2 підприємства теплопостачання з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

Таблиця А.13 – Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності. Протокол замірів на ввідному пристрої підрозділу №2 підприємства теплопостачання з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

№ п/п	Інтервал часу виміру		Коефіцієнт несиметрії KU2ср, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець				
1	12:00	12:30	0,23	600	0	0
2	12:30	13:00	0,28	600	0	0
3	13:00	13:30	0,25	600	0	0
4	13:30	14:00	0,22	600	0	0
5	14:00	14:30	0,24	600	0	0
6	14:30	15:00	0,25	600	0	0
7	15:00	15:30	0,29	600	0	0
8	15:30	16:00	0,30	600	0	0
9	16:00	16:30	0,34	600	0	0
10	16:30	17:00	0,33	600	0	0
11	17:00	17:30	0,34	599	0	0
12	17:30	18:00	0,37	601	0	0
13	18:00	18:30	0,39	599	0	0
14	18:30	19:00	0,37	600	0	0
15	19:00	19:30	0,38	600	0	0
16	19:30	20:00	0,36	600	0	0
17	20:00	20:30	0,34	600	0	0

Продовження таблиці табл. А.13

1	2	3	4	5	6	7
18	20:30	21:00	0,36	600	0	0
19	21:00	21:30	0,35	600	0	0
20	21:30	22:00	0,38	600	0	0
21	22:00	22:30	0,36	600	0	0
22	22:30	23:00	0,32	600	0	0
23	23:00	23:30	0,30	600	0	0
24	23:30	00:00	0,31	600	0	0
25	00:00	00:30	0,31	600	0	0
26	00:30	01:00	0,30	601	0	0
27	01:00	01:30	0,29	600	0	0
28	01:30	02:00	0,30	600	0	0
29	02:00	02:30	0,29	600	0	0
30	02:30	03:00	0,29	600	0	0
31	03:00	03:30	0,25	600	0	0
32	03:30	04:00	0,29	600	0	0
33	04:00	04:30	0,29	600	0	0
34	04:30	05:00	0,28	600	0	0
35	05:00	05:30	0,30	600	0	0
36	05:30	06:00	0,27	600	0	0
37	06:00	06:30	0,26	600	0	0
38	06:30	07:00	0,27	600	0	0
39	07:00	07:30	0,32	600	0	0
40	07:30	08:00	0,33	600	0	0
41	08:00	08:30	0,34	600	0	0
42	08:30	09:00	0,28	600	0	0
43	09:00	09:30	0,26	600	0	0
44	09:30	10:00	0,29	600	0	0
45	10:00	10:30	0,29	599	0	0
46	10:30	11:00	0,27	600	0	0
47	11:00	11:30	0,26	600	0	0
48	11:30	12:00	0,28	600	0	0

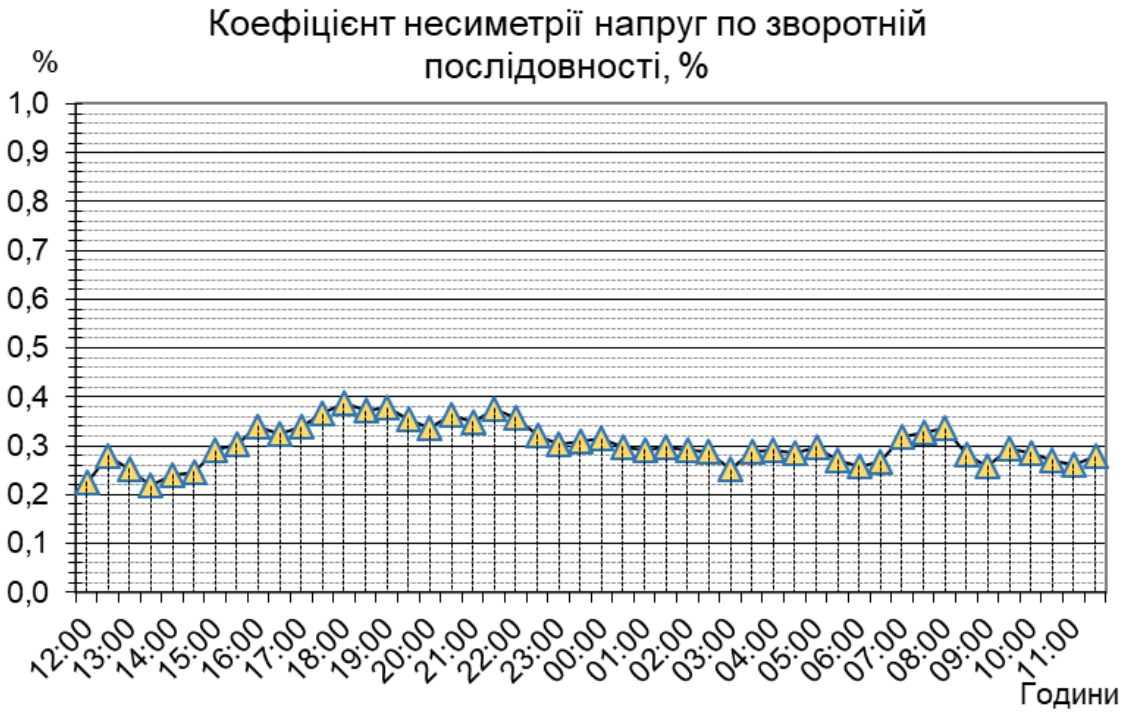


Рисунок А.12 – Графік коефіцієнта несиметрії напруг по зворотній послідовності з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

Таблиця А.14 – Коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю. Протокол замірів на ввідному пристрої підрозділу №2 підприємства теплопостачання з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

№ п/п	Інтервал часу виміру		Коефіцієнт несиметрії KU0ср, %	Число вимірів	Число виходів за нормально допустиме значення	Число виходів за гранично допустиме значення
	Початок	Кінець				
1	12:00	12:30	1,68	600	142	0
2	12:30	13:00	2,40	600	435	0
3	13:00	13:30	2,07	600	336	0
4	13:30	14:00	1,31	600	23	0
5	14:00	14:30	1,57	600	118	0
6	14:30	15:00	1,80	600	167	0
7	15:00	15:30	2,02	600	253	0
8	15:30	16:00	2,36	600	518	0
9	16:00	16:30	2,91	600	599	1
10	16:30	17:00	2,81	600	598	0
11	17:00	17:30	2,54	599	542	0
12	17:30	18:00	2,57	601	549	0
13	18:00	18:30	3,62	599	284	282
14	18:30	19:00	2,79	600	438	43
15	19:00	19:30	3,65	600	398	197

Продовження таблиці А.14

1	2	3	4	5	6	7
16	19:30	20:00	3,06	600	528	72
17	20:00	20:30	2,81	600	567	3
18	20:30	21:00	3,03	600	600	0
19	21:00	21:30	2,54	600	600	0
20	21:30	22:00	2,63	600	600	0
21	22:00	22:30	2,57	600	500	0
22	22:30	23:00	1,60	600	96	0
23	23:00	23:30	1,32	600	0	0
24	23:30	00:00	1,66	600	129	0
25	00:00	00:30	1,76	600	107	0
26	00:30	01:00	1,54	601	47	0
27	01:00	01:30	1,44	600	45	0
28	01:30	02:00	1,42	600	29	0
29	02:00	02:30	1,51	600	78	0
30	02:30	03:00	1,53	600	10	0
31	03:00	03:30	1,27	600	25	0
32	03:30	04:00	1,35	600	9	0
33	04:00	04:30	1,45	600	12	0
34	04:30	05:00	1,30	600	19	0
35	05:00	05:30	1,55	600	19	0
36	05:30	06:00	1,60	600	90	0
37	06:00	06:30	1,73	600	73	0
38	06:30	07:00	1,70	600	37	0
39	07:00	07:30	2,16	600	337	0
40	07:30	08:00	1,39	600	63	0
41	08:00	08:30	2,05	600	250	0
42	08:30	09:00	1,49	600	38	0
43	09:00	09:30	1,55	600	110	0
44	09:30	10:00	1,49	600	161	0
45	10:00	10:30	1,34	599	1	0
46	10:30	11:00	1,02	600	0	0
47	11:00	11:30	0,89	600	0	0
48	11:30	12:00	1,55	600	91	0

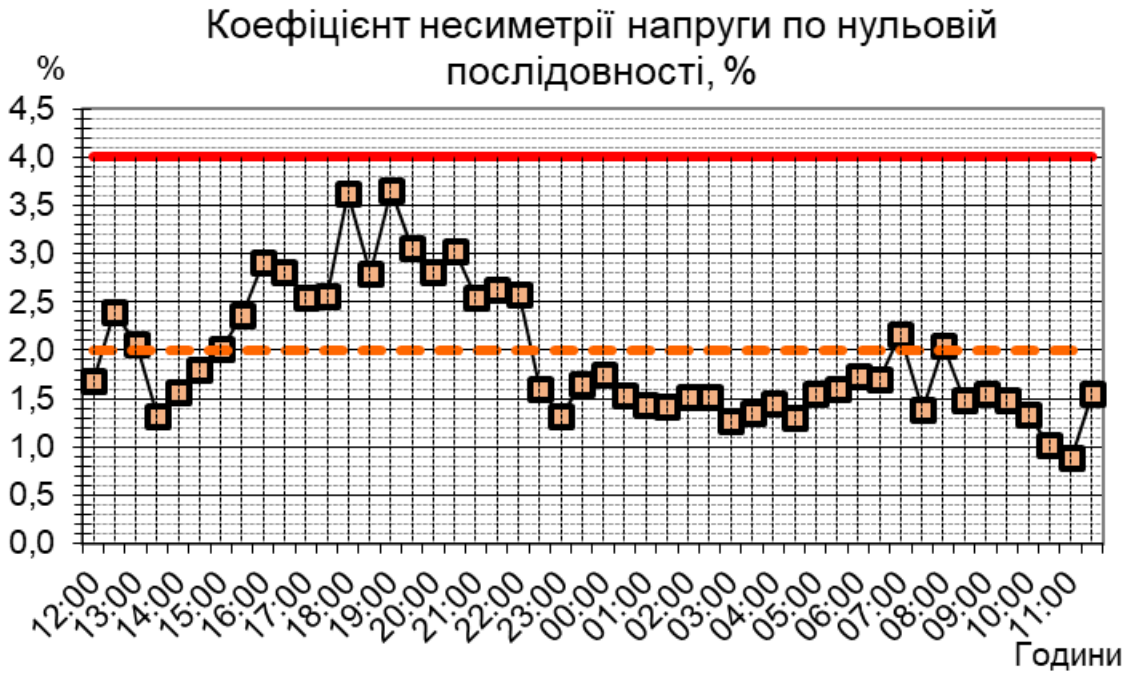


Рисунок А.13 – Графік коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовністю з 13.01.2021 12:00 по 14.01.2021 12:00

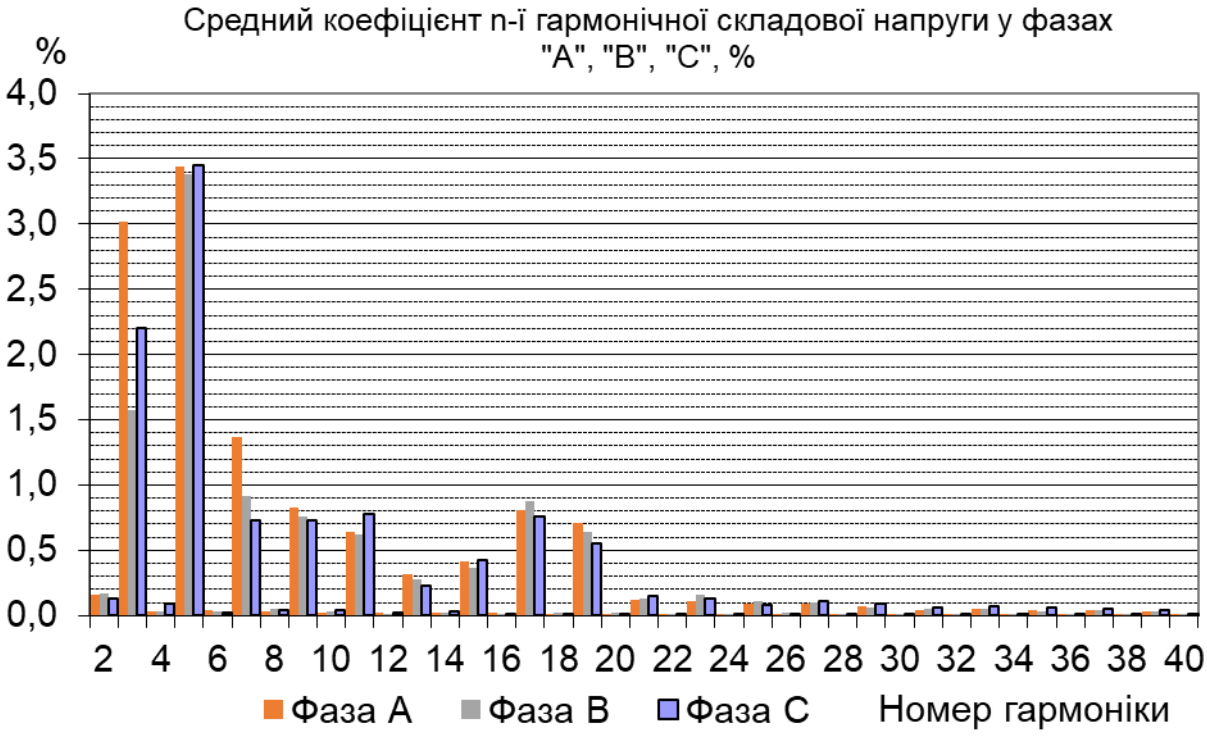


Рисунок А.14 – Середній коефіцієнт n-ї гармонічної складової напруги у фазах "A", "B", "C", %

Таблиця А.15 – Журнал подій та виходів ПЯЕЕ за нормально та гранично допустимі значення. Журнал перенапруги (Фрагмент)

№ п/п	Початок	Фаза	Тривалість, с	Пікове значення, кВ	Допустимий рівень, кВ	Коефіцієнт тимчасового перенапруження
1	11:56	A	0,05	0,245	0,242	1,1166
2	12:16	A	0,02	0,243	0,242	1,1099
3	12:16	A	0,06	0,245	0,242	1,1147
4	12:18	A	0,04	0,244	0,242	1,1130
5	12:21	A	0,07	0,246	0,242	1,1192
6	12:30	A	0,01	0,241	0,242	1,1000
7	12:31	A	0,12	0,243	0,242	1,1063
8	12:31	A	0,10	0,243	0,242	1,1090
9	12:32	A	0,01	0,242	0,242	1,1015
10	12:32	A	0,01	0,241	0,242	1,1003
11	12:34	A	25,60	0,242	0,242	1,1040
12	12:34	A	2,57	0,242	0,242	1,1023
13	12:34	A	0,03	0,242	0,242	1,1008
14	12:34	A	28,07	0,242	0,242	1,1046
15	12:34	A	3,57	0,242	0,242	1,1026
16	12:34	A	6,89	0,242	0,242	1,1025
17	12:34	A	5,83	0,242	0,242	1,1023
18	12:35	A	0,03	0,242	0,242	1,1009
19	12:35	A	0,03	0,242	0,242	1,1008
20	12:35	A	0,57	0,242	0,242	1,1013
21	12:35	A	0,67	0,242	0,242	1,1014
22	12:35	A	24,17	0,244	0,242	1,1100
23	12:36	A	43,67	0,243	0,242	1,1096
24	12:36	A	5,33	0,242	0,242	1,1043
25	12:37	A	0,76	0,242	0,242	1,1047
26	12:37	A	0,09	0,246	0,242	1,1224

Розрив таблиці (всього 3159 строк)

3148	11:58	A	1,27	0,242	0,242	1,1018
3149	11:58	A	1,17	0,242	0,242	1,1017
3150	11:58	A	0,03	0,241	0,242	1,1006
3151	11:58	A	0,01	0,241	0,242	1,1001
3152	11:58	A	0,39	0,242	0,242	1,1015
3153	11:58	A	1,51	0,242	0,242	1,1020
3154	11:58	A	2,53	0,242	0,242	1,1025
3155	11:58	A	0,01	0,241	0,242	1,1003
3156	11:58	A	0,01	0,241	0,242	1,1006
3157	11:58	A	0,01	0,241	0,242	1,1000
3158	11:58	A	0,65	0,242	0,242	1,1018
3159	11:59	A	15,93	0,243	0,242	1,1095

Додаток Б Перевірка методу визначення розладки на тестовому прикладі із сильною роздільністю

Додаток Б1 Аналіз роздільності часового ряду для тестового прикладу test 1 (сильна роздільність)

Аналіз роздільності часового ряду для тестового прикладу test 1 (має місце сильна роздільність). Ряд y_{test1} є сумою трьох структурних складових: $y_1 = 3sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$, $y_2 = 2sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$, $y_3 = 5sin\left(\frac{2\pi}{11}t\right)$. При розкладанні ряду на структурні складові використали програмний продукт Caterpillar [130]. Результати представлені на рис. В.31, В.32, В.33.

Рисунок Б.15 – Значення власних чисел (у відсотках), одержані при сингулярному розкладанні часового ряду y_{test1}.

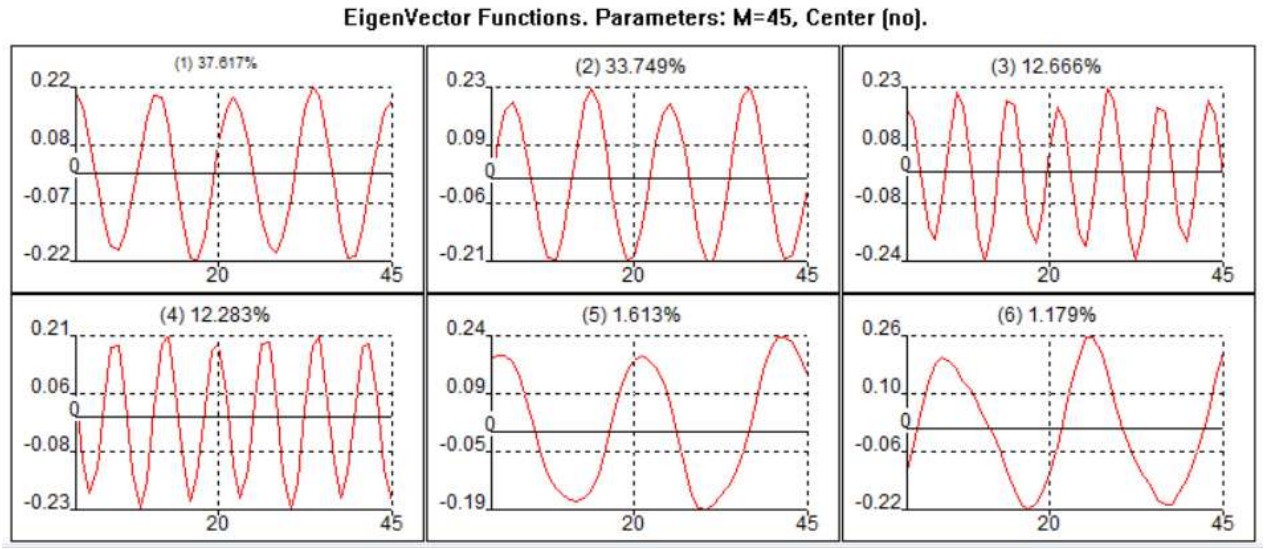


Рисунок Б.16 – Власні вектори, отримані при сингулярному розкладі часового ряду y_{test1}.

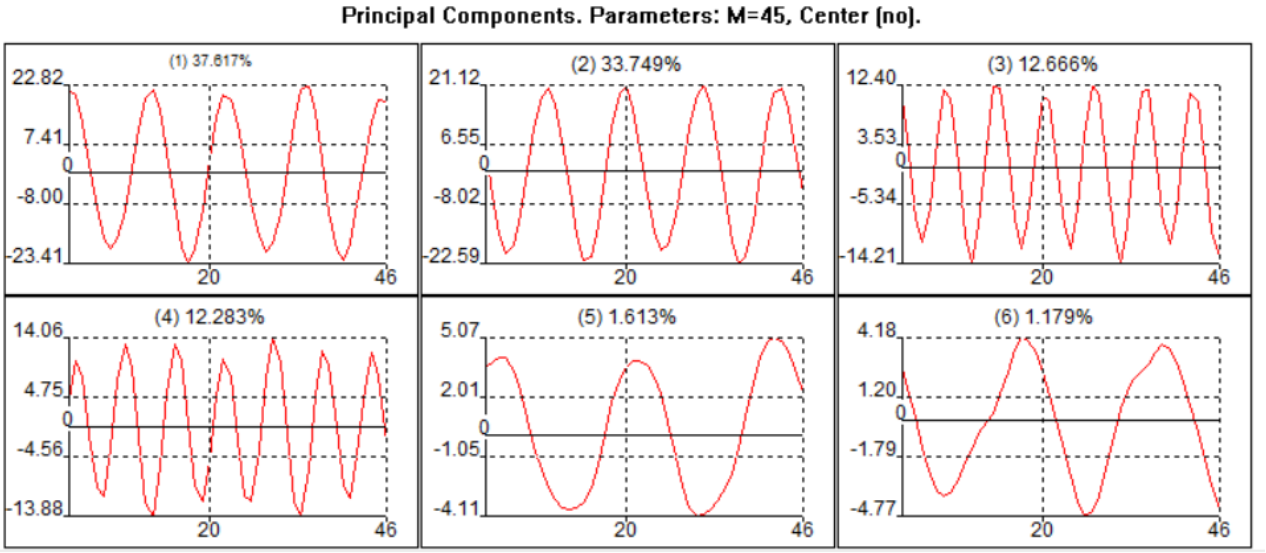


Рисунок Б.17 – Головні компоненти, одержані при сингулярному розкладанні часового ряду y_{test1}.

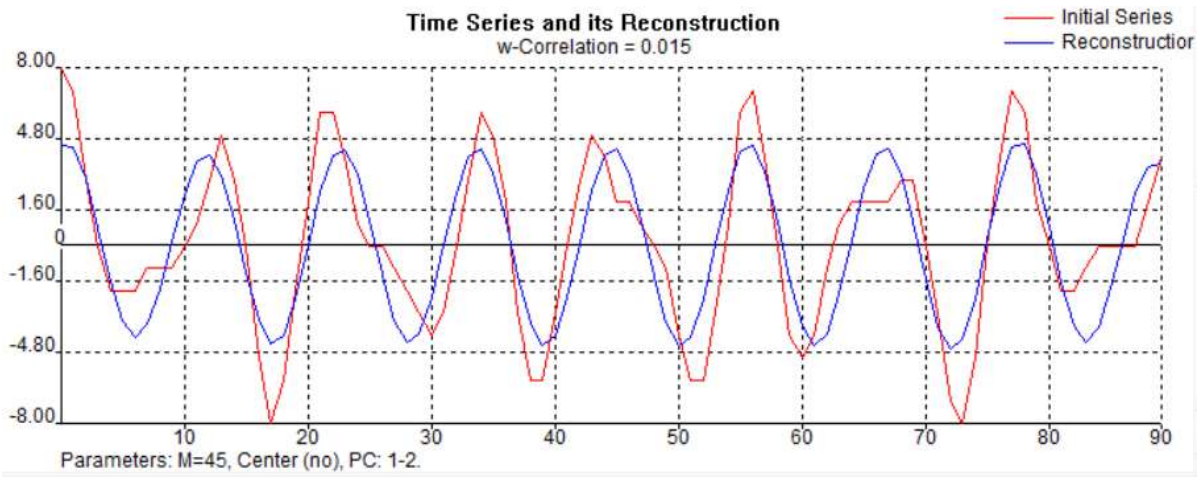


Рисунок Б.18 – Відновлення часового ряду y_{test1} по першій парі власних трійок (вилучення структурної компоненти $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{11}t\right)$)

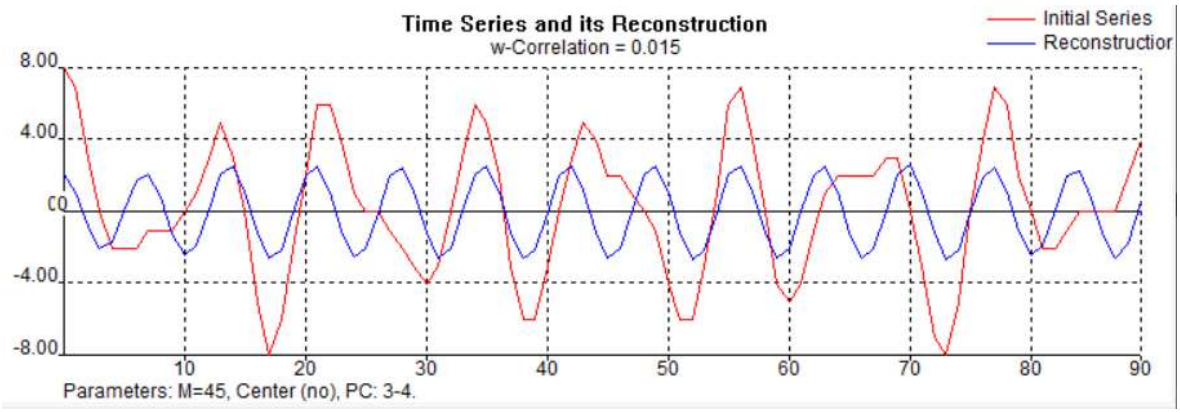


Рисунок Б.19 – Відновлення часового ряду y_{test1} по другій парі власних трійок (вилучення структурної компоненти $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$)

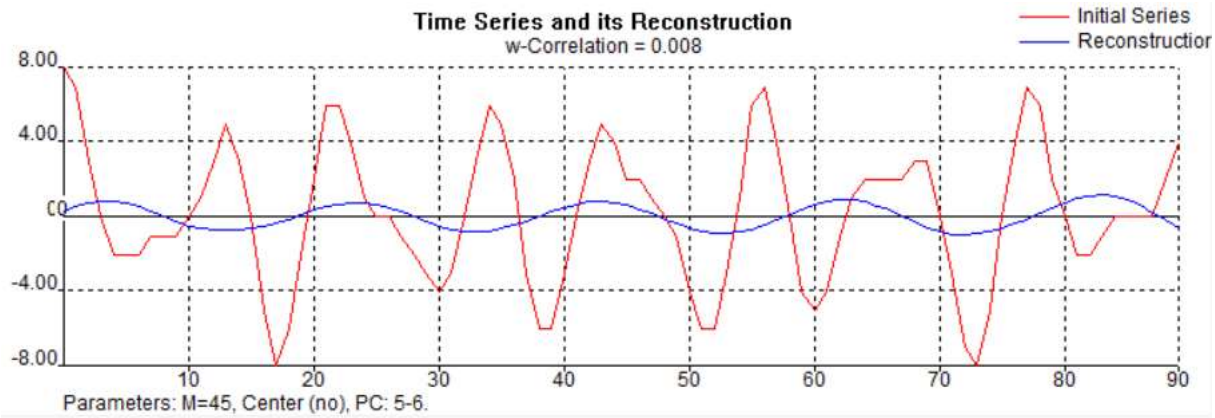


Рисунок Б.20 – Відновлення часового ряду y_{test1} по третій парі власних трійок (вилучення структурної компоненти $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$)

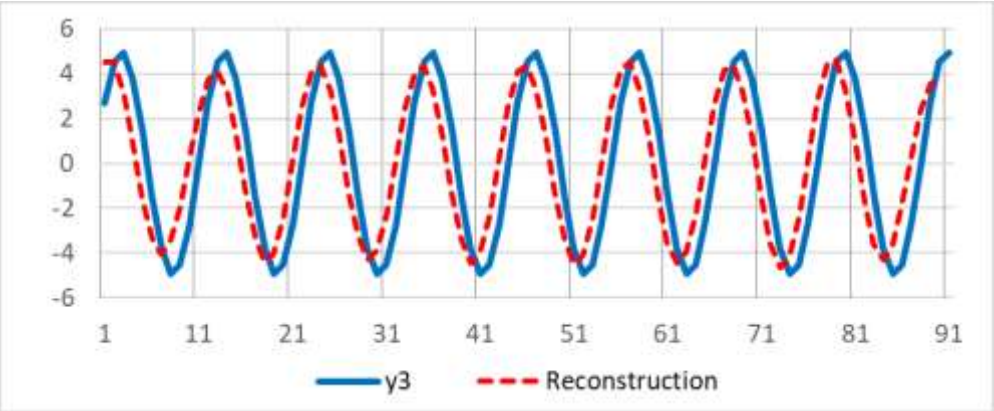


Рисунок Б.21 – Порівняння вилученої за методом SSA структурної компоненти y_3 з вихідною структурною складовою $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{11}t\right)$

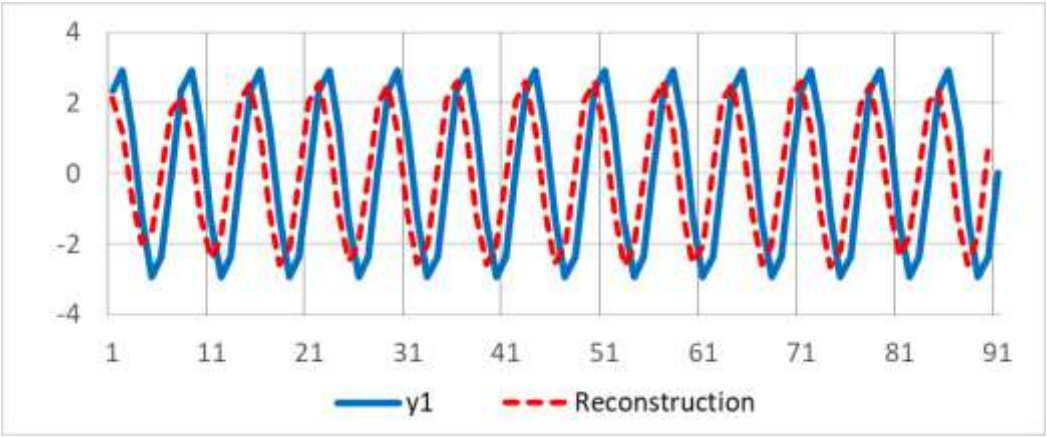


Рисунок Б.22 – Порівняння вилученої за методом SSA структурної компоненти y_1 з вихідною структурною складовою $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$

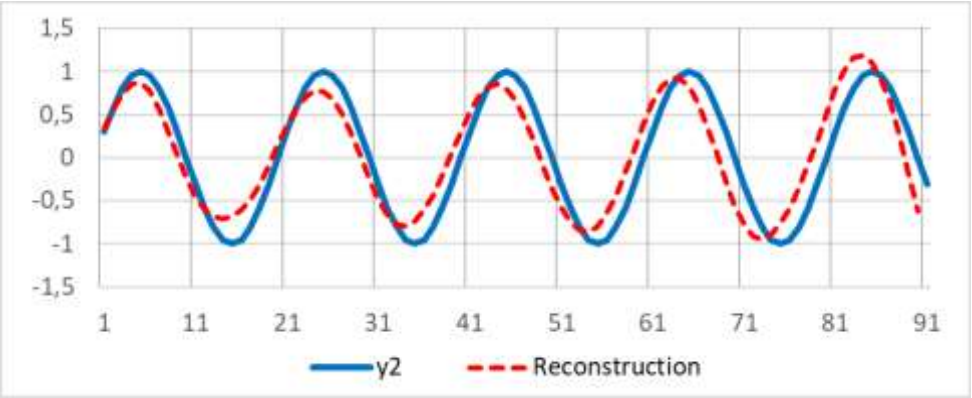


Рисунок Б.23 – Порівняння вилученої за методом SSA структурної компоненти y_2 з вихідною структурною складовою $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$

Додаток Б2 Таблиці і графіки до тестового прикладу test-1_1

Таблиця Б.16 – Значення власних чисел матриці під час руху діапазону перегляду (test 1.1, D=40)

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	1-40	2-41	3-42	4-43	5-44	6-45	7-46	8-47	9-48	10-49	11-50	12-51	13-52	14-53	15-54	16-55	17-56	18-57	19-58	20-59	21-60	22-61	23-62	24-63	25-64	26-65
1	36,355	36,374	36,459	36,462	36,390	36,352	36,251	35,221	33,111	31,658	31,154	29,603	27,327	26,372	28,912	32,158	33,629	33,109	31,287	31,073	33,581	34,190	33,299	31,709	30,457	30,545
2	33,511	33,522	33,373	33,285	33,298	33,283	32,378	31,525	31,244	30,288	28,606	27,797	27,147	25,914	24,443	21,998	21,081	23,055	26,911	29,008	27,405	26,743	27,488	29,153	30,019	28,781
3	16,025	15,954	15,842	15,736	15,712	15,771	16,462	17,901	19,858	21,681	22,758	23,038	22,696	21,727	21,545	20,803	19,781	18,795	16,883	14,730	14,550	14,432	14,326	14,080	13,576	13,065
4	14,108	14,150	14,326	14,516	14,600	14,594	14,449	14,303	14,207	14,277	14,800	16,201	18,802	21,451	20,134	19,375	18,592	16,607	15,305	14,599	12,657	11,556	10,992	10,493	10,778	12,093
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,460	0,818	0,976	0,978	1,083	1,479	1,809	1,910	1,781	2,250	3,486	4,809	5,495	5,513	5,231	6,133	6,957	7,259	7,267	7,180
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,232	0,430	0,714	0,915	0,897	0,967	1,146	1,509	1,599	1,552	1,722	2,199	3,144	4,618	4,910	4,758	4,946	5,374	5,626
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,174	0,247	0,333	0,398	0,403	0,394	0,406	0,379	0,372	0,354	0,349	0,330	0,356	0,423	0,538	0,670	0,754	0,769
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,157	0,205	0,272	0,343	0,373	0,352	0,358	0,344	0,350	0,332	0,327	0,310	0,309	0,319	0,334	0,363	0,426
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,146	0,174	0,212	0,256	0,295	0,301	0,293	0,284	0,273	0,267	0,266	0,267	0,271	0,280	0,292	0,307
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,140	0,159	0,182	0,204	0,214	0,198	0,200	0,190	0,188	0,181	0,180	0,173	0,180	0,192	0,212
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,135	0,147	0,163	0,181	0,181	0,182	0,183	0,176	0,174	0,169	0,168	0,162	0,165	0,172
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	0,135	0,143	0,135	0,139	0,137	0,132	0,125	0,126	0,122	0,122	0,128	0,137
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,122	0,126	0,131	0,126	0,129	0,123	0,124	0,118	0,119	0,114	0,114	0,118
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,116	0,114	0,112	0,112	0,105	0,102	0,100	0,098	0,095	0,097	0,101
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,111	0,106	0,105	0,100	0,099	0,094	0,094	0,091	0,090	0,092
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,051	0,100	0,094	0,091	0,087	0,086	0,082	0,082	0,083
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,088	0,089	0,085	0,083	0,079	0,078	0,078
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,039	0,067	0,080	0,076	0,074	0,074
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,009	0,028	0,070	0,072	0,071
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,006	0,028	0,069
sum 7-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,174	0,404	0,684	0,984	1,252	1,481	1,677	1,818	1,879	1,904	1,920	1,931	1,956	2,034	2,180	2,361	2,529	2,709

Продовження таблиці Б.16

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	27-66	28-67	29-68	30-69	31-70	32-71	33-72	34-73	35-74	36-75	37-76	38-77	39-78	40-79	41-80	42-81	43-82	44-83	45-84	46-85	47-86	48-87	49-88	50-89	51-90	52-91
1	29,847	28,907	29,401	30,161	30,575	30,466	29,842	29,007	30,530	32,476	34,007	34,568	34,048	33,006	33,866	35,986	37,314	37,454	36,504	34,929	34,581	36,220	37,292	37,354	36,364	34,865
2	28,222	28,480	27,790	27,078	26,755	26,859	27,471	28,580	27,865	27,174	26,922	27,325	28,557	30,391	30,559	29,480	28,883	29,029	29,991	31,643	32,202	30,778	29,945	30,131	31,300	32,898
3	14,110	14,575	14,114	14,002	14,424	14,328	13,729	13,101	12,846	13,070	13,364	13,247	12,806	12,934	13,107	12,833	12,496	12,473	12,486	12,403	12,400	12,307	12,229	12,200	12,103	11,965
4	12,046	11,823	12,259	12,355	11,725	11,641	12,261	12,603	12,388	11,841	11,384	11,511	12,069	11,934	11,475	11,360	11,468	11,450	11,411	11,383	11,313	11,307	11,228	11,065	11,036	11,145
5	7,248	7,707	7,849	7,631	8,251	8,899	8,881	8,606	8,462	8,387	8,109	7,728	7,274	6,704	6,064	5,494	5,153	5,010	4,920	4,873	4,949	5,009	5,051	5,067	5,046	4,976
6	5,733	5,937	6,366	6,885	6,715	6,563	6,791	7,203	7,086	6,299	5,533	4,997	4,674	4,537	4,527	4,533	4,476	4,483	4,645	4,769	4,556	4,378	4,256	4,183	4,151	4,149
7	0,748	0,724	0,690	0,619	0,486	0,340	0,246	0,197	0,177	0,170	0,156	0,153	0,165	0,174	0,145	0,154	0,138	0,082	0,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,533	0,512	0,396	0,307	0,251	0,214	0,188	0,177	0,169	0,157	0,151	0,137	0,136	0,119	0,128	0,101	0,067	0,018	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,309	0,290	0,256	0,221	0,185	0,148	0,116	0,097	0,095	0,091	0,087	0,084	0,085	0,077	0,073	0,058	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,226	0,207	0,176	0,148	0,126	0,110	0,098	0,094	0,088	0,086	0,075	0,076	0,070	0,069	0,056	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,170	0,156	0,139	0,122	0,106	0,091	0,077	0,068	0,067	0,067	0,064	0,062	0,061	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,139	0,126	0,110	0,096	0,085	0,075	0,068	0,067	0,066	0,060	0,059	0,060	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,116	0,106	0,095	0,085	0,076	0,069	0,065	0,061	0,059	0,057	0,055	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,101	0,092	0,082	0,074	0,067	0,062	0,060	0,058	0,056	0,055	0,035	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,089	0,082	0,075	0,069	0,063	0,059	0,058	0,057	0,045	0,010	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,081	0,075	0,069	0,064	0,060	0,056	0,042	0,024	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,075	0,070	0,066	0,062	0,043	0,019	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,071	0,067	0,063	0,021	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,069	0,065	0,005	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,067	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
sum 7-20	2,794	2,572	2,222	1,889	1,554	1,244	1,025	0,900	0,824	0,753	0,682	0,626	0,571	0,493	0,402	0,315	0,210	0,100	0,042	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

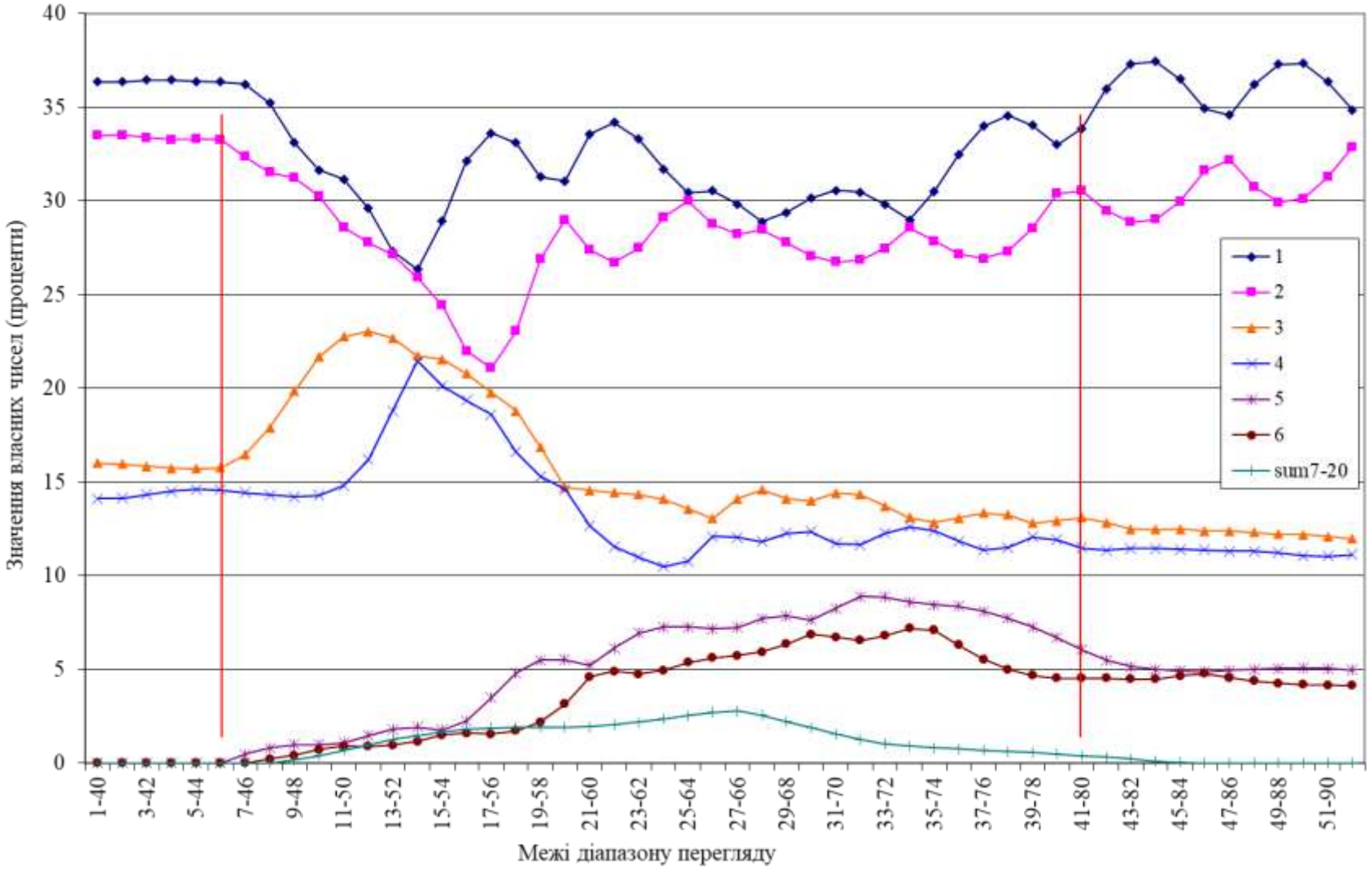


Рисунок Б.24 – Динаміка власних чисел (test 1.1, діапазон перегляду D=40, довжина вікна L=20)

Таблиця Б.17 – Значення власних чисел матриці під час руху діапазону перегляду (test 1.1, D=30)

номер власн. числа	Межа діапазону перегляду																			
	1-30	2-31	3-32	4-33	5-34	6-35	7-36	8-37	9-38	10-39	11-40	12-41	13-42	14-43	15-44	16-45	17-46	18-47	19-48	20-49	21-50
1	39,761	38,653	35,931	40,413	42,789	41,619	40,844	41,989	40,018	38,051	39,841	39,769	37,206	38,029	42,119	42,592	41,172	40,015	38,969	39,449	39,026
2	29,883	30,815	35,106	33,390	33,226	35,526	36,772	35,355	35,715	35,009	30,952	29,922	32,733	33,951	32,414	33,662	35,095	35,325	34,528	30,561	25,905
3	21,127	20,781	18,662	15,398	12,673	12,288	13,006	14,034	15,919	18,446	20,246	20,588	19,448	16,636	13,481	12,775	13,717	14,899	16,511	19,135	22,426
4	9,229	9,752	10,301	10,800	11,312	10,568	9,378	8,622	8,348	8,494	8,962	9,721	10,613	11,384	11,985	10,971	9,302	8,182	7,600	7,611	8,577
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,714	1,204	1,438	1,494	1,552
6	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,376	0,672	1,096	1,449
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,283	0,395	0,487
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,258	0,336
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,242
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
sum 7-15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,283	0,653	1,065

Продовження таблиці Б.17.

номер власн. числа	Межа діапазону перегляду																				
	22-51	23-52	24-53	25-54	26-55	27-56	28-57	29-58	30-59	31-60	32-61	33-62	34-63	35-64	36-65	37-66	38-67	39-68	40-69	41-70	42-71
1	36,456	32,897	29,546	36,176	42,969	45,744	44,715	41,680	38,992	40,821	40,454	38,535	38,406	39,906	39,839	38,292	35,933	35,052	36,218	37,152	37,647
2	24,957	23,767	26,923	26,352	24,426	24,849	28,261	33,680	38,049	36,122	34,939	35,774	35,548	33,144	31,618	31,796	33,080	33,266	32,998	34,473	36,336
3	22,552	21,500	19,858	18,220	15,453	12,160	10,626	9,413	7,686	6,510	9,224	11,004	10,833	10,787	13,936	15,705	16,050	15,827	15,705	15,351	14,552
4	11,472	17,186	19,146	14,797	12,328	11,307	9,096	7,011	6,057	5,773	5,505	5,599	7,595	9,884	9,395	10,029	11,609	12,857	11,831	9,130	6,882
5	1,738	1,673	1,714	1,828	2,203	3,201	4,372	4,834	4,703	4,511	4,251	3,994	3,407	3,292	2,974	2,369	1,783	1,645	2,020	2,673	3,217
6	1,430	1,384	1,104	0,853	0,743	0,760	0,974	1,485	2,602	4,297	3,667	3,415	2,836	1,817	1,225	0,935	0,798	0,739	0,726	0,817	1,054
7	0,466	0,494	0,468	0,511	0,527	0,480	0,431	0,409	0,423	0,445	0,481	0,456	0,366	0,295	0,260	0,244	0,217	0,214	0,178	0,158	0,148
8	0,421	0,412	0,458	0,421	0,434	0,444	0,409	0,385	0,367	0,375	0,363	0,323	0,278	0,251	0,238	0,205	0,202	0,165	0,146	0,139	0,109
9	0,272	0,262	0,265	0,258	0,273	0,275	0,247	0,230	0,229	0,240	0,246	0,218	0,181	0,152	0,145	0,125	0,122	0,105	0,092	0,092	0,055
10	0,235	0,234	0,245	0,229	0,231	0,241	0,228	0,222	0,208	0,210	0,201	0,177	0,153	0,144	0,128	0,115	0,105	0,091	0,084	0,015	0,000
11	0,000	0,190	0,211	0,195	0,192	0,194	0,177	0,170	0,162	0,166	0,163	0,144	0,125	0,111	0,105	0,094	0,091	0,039	0,002	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,063	0,150	0,178	0,176	0,168	0,160	0,151	0,151	0,143	0,128	0,114	0,109	0,098	0,091	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,011	0,040	0,164	0,151	0,144	0,134	0,134	0,128	0,116	0,106	0,100	0,039	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,004	0,146	0,138	0,129	0,126	0,120	0,110	0,052	0,007	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,038	0,108	0,121	0,115	0,008	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
sum 7-15	1,394	1,592	1,710	1,775	1,876	1,978	1,957	1,896	1,911	1,968	1,960	1,680	1,375	1,169	1,013	0,875	0,746	0,614	0,502	0,404	0,312

Продовження таблиці Б.17.

номер власн. числа	Межа діапазону перегляду																			
	43-72	44-73	45-74	46-75	47-76	48-77	49-78	50-79	51-80	52-81	53-82	54-83	55-84	56-85	57-86	58-87	59-88	60-89	61-90	62-91
1	38,350	39,899	41,067	40,874	39,130	36,780	36,246	35,822	35,139	39,058	42,608	43,921	42,954	40,306	40,197	41,379	41,449	40,515	39,250	38,469
2	37,660	38,051	37,341	35,268	34,043	34,097	31,881	29,797	32,312	31,356	29,916	31,275	34,622	37,678	36,711	34,451	33,626	33,666	34,345	35,522
3	13,065	10,661	8,926	11,539	14,719	15,487	14,912	16,076	14,584	14,366	14,343	12,529	10,022	10,676	12,299	12,735	12,089	12,269	12,865	12,205
4	5,832	5,855	6,853	6,555	6,804	8,792	12,588	14,314	14,073	11,166	8,930	8,161	8,616	7,923	7,644	8,555	10,305	11,301	11,318	11,336
5	3,377	3,288	3,085	3,231	3,399	3,371	3,138	2,882	2,845	3,004	3,074	2,822	2,297	2,012	2,111	2,083	1,856	1,621	1,586	1,773
6	1,482	2,113	2,691	2,533	1,905	1,473	1,235	1,108	1,047	1,049	1,130	1,292	1,489	1,404	1,037	0,798	0,675	0,628	0,635	0,697
7	0,122	0,127	0,037	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,112	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
sum 7-15	0,234	0,132	0,037	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

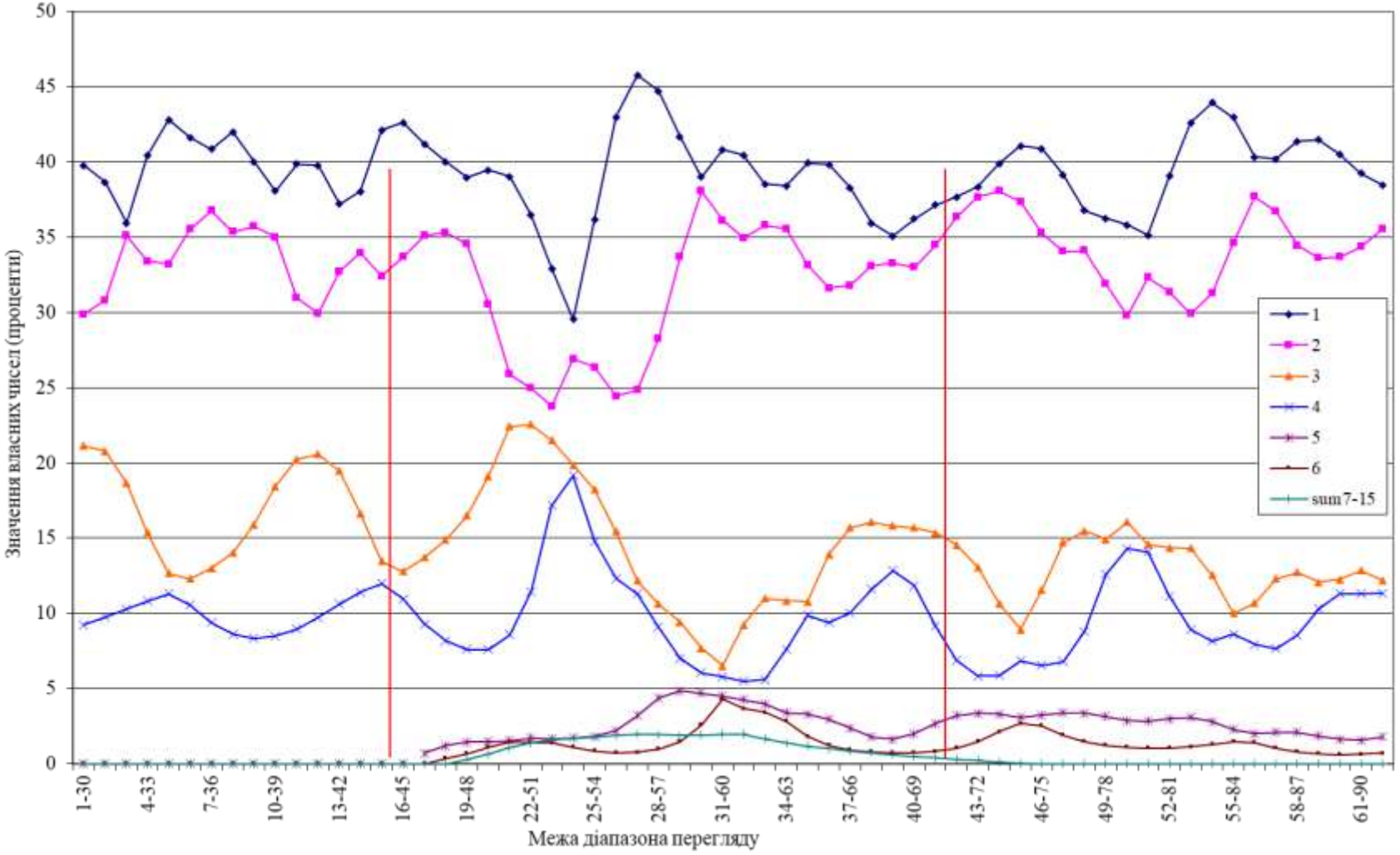


Рисунок Б.25 – Динаміка власних чисел (test 1.1, діапазон перегляду D=30, довжина вікна L=15)

Додаток Б3 Таблиці і графіки до тестового прикладу test-1_2

Таблиця Б.18 – Значення власних чисел матриці під час руху діапазону перегляду (test 1.2 (D=40))

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	1-40	2-41	3-42	4-43	5-44	6-45	7-46	8-47	9-48	10-49	11-50	12-51	13-52	14-53	15-54	16-55	17-56	18-57	19-58	20-59	21-60	22-61	23-62	24-63	25-64	26-65
1	75,000	75,955	77,007	78,236	79,599	80,968	82,271	83,528	84,706	85,776	86,740	87,543	88,051	88,209	88,149	88,063	88,015	87,961	87,898	87,875	87,872	87,802	87,635	87,448	87,325	87,271
2	8,979	8,625	8,208	7,691	7,099	6,525	6,094	5,625	5,105	4,756	4,445	4,008	3,540	3,332	3,646	4,032	4,192	4,125	3,925	3,887	4,137	4,147	4,021	3,848	3,878	3,875
3	8,310	7,801	7,327	6,873	6,459	6,094	5,577	5,108	4,761	4,335	3,916	3,644	3,483	3,303	3,083	2,744	2,554	2,732	3,361	3,681	3,481	3,387	3,479	3,713	3,682	3,568
4	4,571	4,398	4,200	3,988	3,764	3,530	3,272	3,021	2,810	2,625	2,459	2,390	2,528	2,781	2,733	2,627	2,356	2,326	2,097	1,841	1,790	1,851	1,969	2,017	1,968	1,871
5	3,095	3,186	3,231	3,190	3,059	2,864	2,722	2,608	2,467	2,299	2,145	2,012	1,887	1,787	1,755	1,845	2,124	2,034	1,839	1,737	1,563	1,455	1,391	1,326	1,361	1,544
6	0,046	0,035	0,028	0,023	0,020	0,018	0,054	0,067	0,066	0,109	0,167	0,236	0,293	0,303	0,266	0,269	0,358	0,410	0,410	0,392	0,590	0,784	0,876	0,914	0,920	0,914
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,037	0,058	0,054	0,065	0,082	0,103	0,135	0,187	0,218	0,193	0,207	0,265	0,380	0,357	0,360	0,411	0,515	0,636	0,702
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,025	0,023	0,029	0,037	0,046	0,053	0,056	0,054	0,047	0,044	0,044	0,042	0,042	0,042	0,040	0,043	0,047	0,059
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,022	0,022	0,025	0,030	0,037	0,043	0,046	0,044	0,043	0,041	0,041	0,039	0,039	0,040	0,038	0,039	0,040
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,012	0,019	0,021	0,024	0,027	0,030	0,028	0,024	0,024	0,024	0,023	0,023	0,023	0,023	0,025	0,028
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,005	0,018	0,019	0,021	0,023	0,024	0,023	0,022	0,022	0,022	0,021	0,022	0,021	0,021	0,022
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,017	0,017	0,019	0,019	0,017	0,016	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016	0,018
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,016	0,016	0,017	0,016	0,016	0,015	0,016	0,015	0,015	0,015	0,015	0,015
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,015	0,014	0,014	0,013	0,013	0,013	0,013	0,012	0,012	0,013
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,014	0,013	0,013	0,013	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,013	0,012	0,012	0,011	0,011	0,010	0,010	0,011
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,009	0,011	0,011	0,010	0,010	0,010	0,010
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,010	0,010	0,010	0,009	0,009
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,005	0,009	0,009	0,009
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,009
sum 8-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,028	0,046	0,064	0,086	0,117	0,150	0,180	0,203	0,208	0,204	0,205	0,208	0,209	0,214	0,217	0,220	0,228	0,255

Продовження таблиці Б.18

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	27-66	28-67	29-68	30-69	31-70	32-71	33-72	34-73	35-74	36-75	37-76	38-77	39-78	40-79	41-80	42-81	43-82	44-83	45-84	46-85	47-86	48-87	49-88	50-89	51-90	52-91
1	87,283	87,338	87,402	87,477	87,563	87,685	87,889	88,170	88,430	88,574	88,635	88,725	88,888	89,063	89,203	89,351	89,570	89,842	90,105	90,338	90,563	90,769	90,967	91,168	91,378	91,589
2	3,753	3,644	3,746	3,816	3,819	3,738	3,573	3,514	3,658	3,835	3,970	3,972	3,826	3,636	3,668	3,822	3,862	3,755	3,547	3,318	3,292	3,388	3,414	3,335	3,157	2,948
3	3,552	3,586	3,453	3,362	3,331	3,351	3,407	3,356	3,179	3,072	3,036	3,065	3,161	3,300	3,265	3,102	2,975	2,915	2,944	3,034	2,946	2,751	2,632	2,609	2,668	2,749
4	1,852	1,858	1,800	1,817	1,854	1,816	1,708	1,595	1,527	1,535	1,554	1,522	1,445	1,421	1,421	1,373	1,313	1,282	1,251	1,209	1,174	1,134	1,102	1,081	1,054	1,023
5	1,631	1,576	1,567	1,507	1,423	1,443	1,517	1,513	1,442	1,343	1,274	1,277	1,324	1,303	1,239	1,211	1,198	1,163	1,128	1,098	1,065	1,041	1,011	0,975	0,954	0,943
6	0,931	0,998	1,021	0,990	1,037	1,049	0,994	0,917	0,854	0,848	0,826	0,796	0,756	0,702	0,646	0,608	0,590	0,576	0,559	0,543	0,528	0,512	0,493	0,470	0,444	0,416
7	0,725	0,756	0,811	0,860	0,820	0,783	0,794	0,831	0,819	0,714	0,634	0,578	0,543	0,528	0,523	0,504	0,473	0,458	0,461	0,461	0,433	0,405	0,381	0,361	0,345	0,331
8	0,077	0,071	0,051	0,039	0,033	0,032	0,028	0,024	0,021	0,020	0,018	0,017	0,020	0,019	0,015	0,012	0,013	0,008	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,041	0,038	0,035	0,032	0,031	0,027	0,023	0,022	0,020	0,018	0,017	0,016	0,015	0,013	0,010	0,010	0,007	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,030	0,027	0,022	0,019	0,017	0,016	0,014	0,012	0,011	0,010	0,010	0,011	0,010	0,008	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,022	0,020	0,018	0,017	0,016	0,014	0,012	0,012	0,010	0,010	0,009	0,009	0,007	0,006	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,018	0,016	0,014	0,012	0,012	0,011	0,009	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,015	0,014	0,012	0,011	0,011	0,009	0,009	0,008	0,007	0,007	0,006	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,013	0,012	0,010	0,009	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007	0,006	0,005	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,011	0,011	0,010	0,009	0,008	0,008	0,007	0,007	0,006	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,010	0,010	0,009	0,008	0,008	0,007	0,006	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,010	0,009	0,008	0,008	0,008	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,009	0,009	0,008	0,007	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,009	0,008	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,009	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
sum 8-20	0,274	0,245	0,199	0,171	0,154	0,135	0,117	0,103	0,090	0,080	0,072	0,066	0,058	0,047	0,036	0,028	0,020	0,009	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

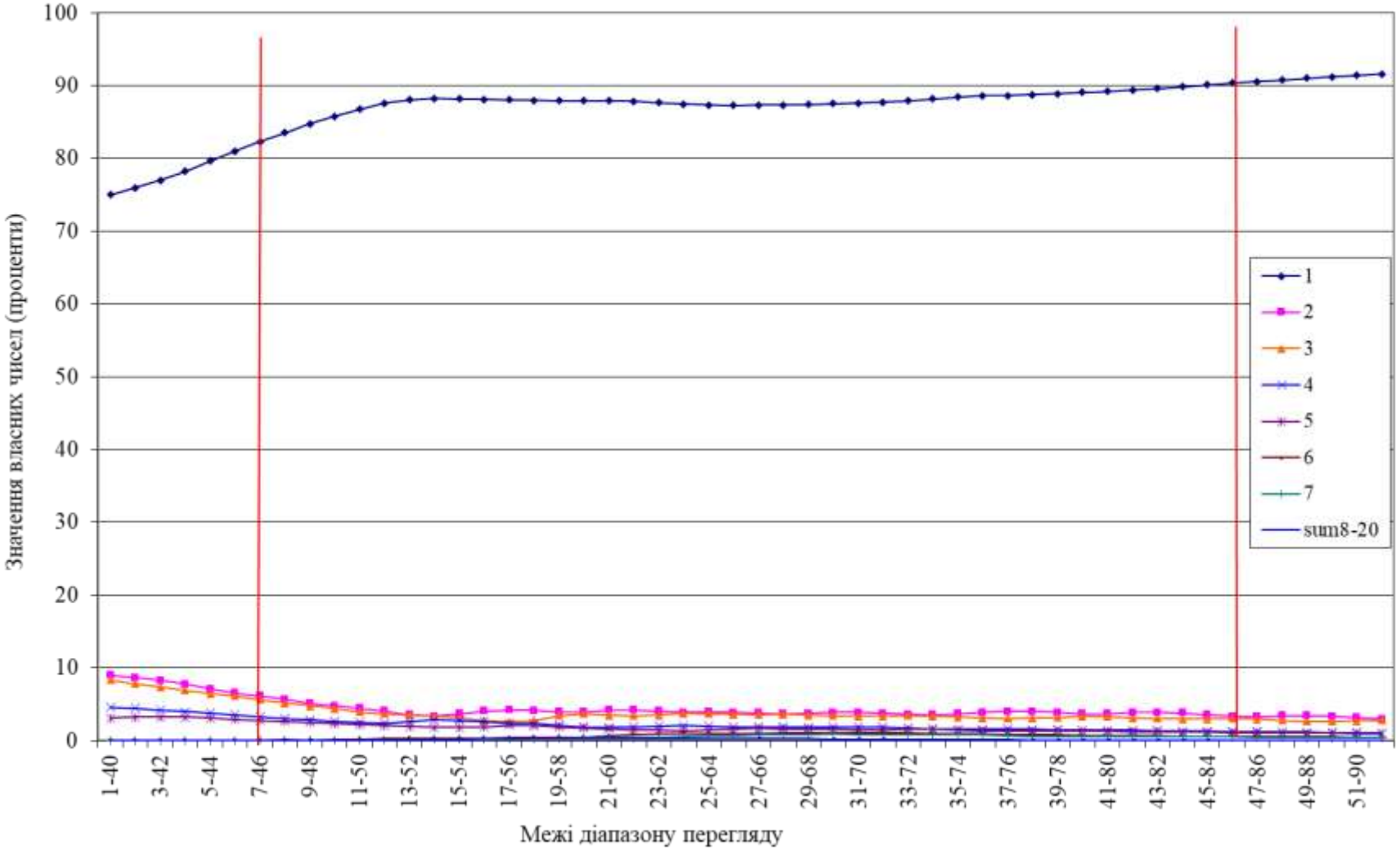


Рисунок Б.26 – Динаміка власних чисел (test 1.2, діапазон перегляду D=40, довжина вікна L=20)

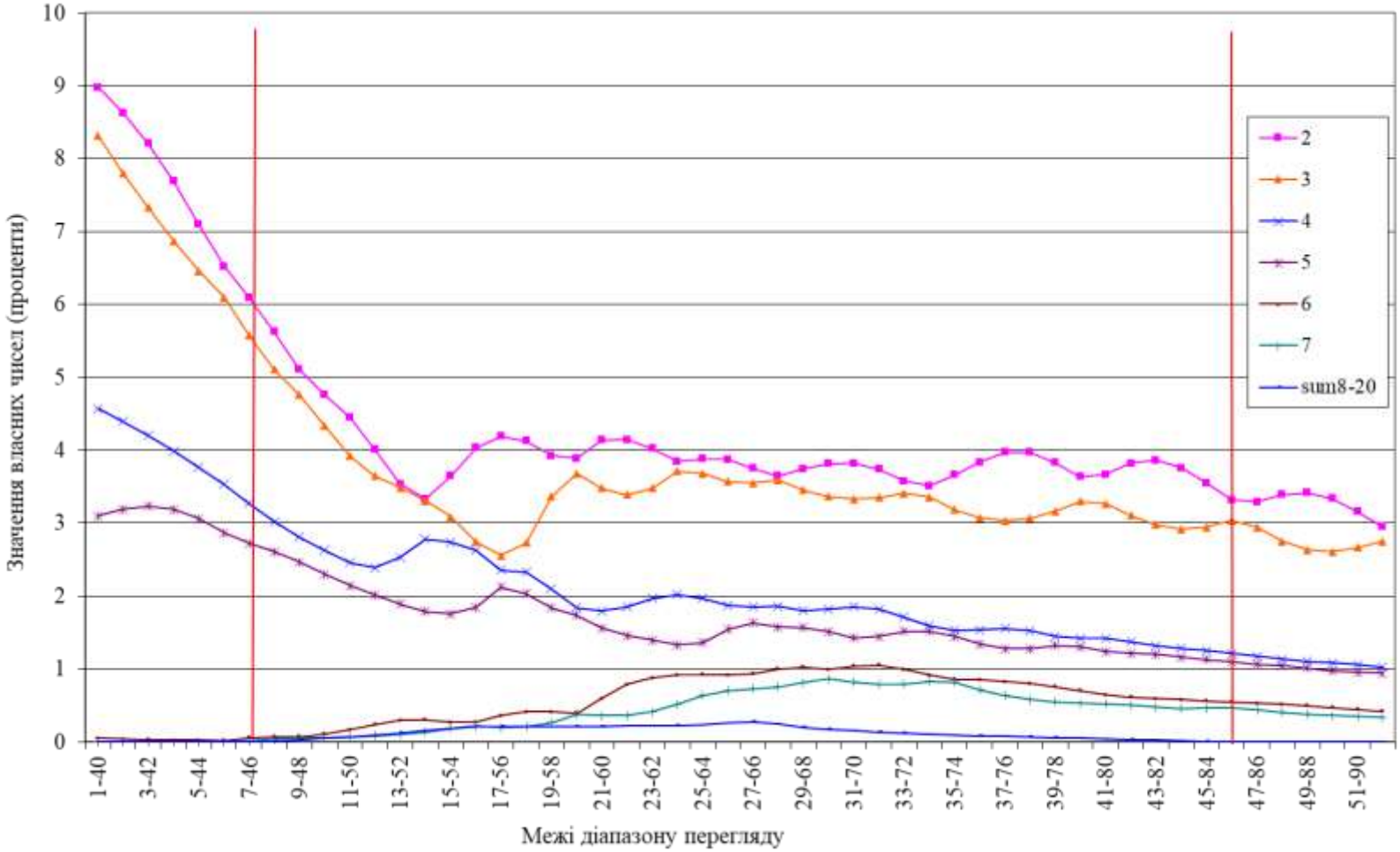


Рисунок Б.27 – Динаміка власних чисел без першої компоненти (test 1.2, діапазон перегляду D=40, довжина вікна L=20)

Додаток Б4 Таблиці і графіки до тестового прикладу test-1_3

Таблиця Б.19 – Значення власних чисел матриці під час руху діапазону перегляду (test 1.3, D=40)

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	1-40	2-41	3-42	4-43	5-44	6-45	7-46	8-47	9-48	10-49	11-50	12-51	13-52	14-53	15-54	16-55	17-56	18-57	19-58	20-59	21-60	22-61	23-62	24-63	25-64	26-65
1	35,756	35,580	37,361	38,134	37,427	35,662	34,860	36,112	36,813	36,589	35,428	33,542	31,929	32,480	32,949	32,588	31,077	28,493	25,730	25,703	25,871	24,919	23,885	24,166	24,618	25,676
2	32,232	32,498	30,923	30,176	30,610	32,007	32,546	30,905	29,745	29,381	29,631	30,255	30,454	28,508	26,595	25,210	24,493	24,435	24,607	22,876	22,046	22,365	23,244	23,765	24,037	23,912
3	11,838	11,818	11,676	11,743	11,930	12,011	12,060	12,415	12,870	12,979	13,302	14,541	15,528	15,780	16,278	17,842	19,021	19,459	19,625	20,941	21,568	21,838	20,816	18,187	17,649	17,763
4	11,084	11,063	11,059	10,987	11,013	11,179	11,257	11,281	11,336	11,802	12,345	12,384	12,867	14,004	14,814	14,732	15,373	16,968	18,565	18,046	17,115	16,483	16,471	16,903	15,609	14,625
5	5,003	4,938	4,821	4,700	4,636	4,714	4,878	4,931	4,951	4,924	4,816	4,748	4,866	5,053	5,220	5,318	5,332	5,305	5,494	6,270	6,996	7,435	7,651	7,822	8,115	7,908
6	4,087	4,103	4,159	4,261	4,385	4,428	4,400	4,276	4,127	4,043	4,073	4,033	3,766	3,496	3,391	3,491	3,804	4,347	4,895	4,965	5,024	5,329	6,037	7,002	7,544	7,469
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,079	0,108	0,167	0,184	0,165	0,184	0,175	0,181	0,192	0,218	0,228	0,246	0,291	0,350	0,410	0,432	0,430	0,514	0,540
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,050	0,093	0,129	0,151	0,147	0,168	0,166	0,177	0,186	0,211	0,223	0,232	0,258	0,296	0,350	0,403	0,386	0,387
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,022	0,081	0,098	0,095	0,111	0,101	0,102	0,113	0,125	0,126	0,144	0,167	0,195	0,227	0,256	0,275	0,283
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,010	0,079	0,086	0,089	0,096	0,099	0,101	0,111	0,124	0,125	0,138	0,156	0,179	0,207	0,237	0,257
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,075	0,076	0,082	0,079	0,081	0,088	0,090	0,097	0,109	0,124	0,142	0,161	0,181	0,198
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,061	0,075	0,075	0,076	0,081	0,089	0,089	0,096	0,107	0,120	0,135	0,151	0,164
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,052	0,052	0,065	0,075	0,077	0,079	0,085	0,093	0,104	0,116	0,128	0,139
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,042	0,045	0,041	0,076	0,076	0,080	0,086	0,093	0,102	0,112	0,122
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,015	0,028	0,021	0,051	0,076	0,080	0,086	0,093	0,101	0,109
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,004	0,013	0,007	0,016	0,077	0,081	0,087	0,093	0,100
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,006	0,004	0,004	0,079	0,083	0,087	0,093
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,003	0,004	0,080	0,084	0,088
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,081	0,085
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,083
sum 7-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,079	0,158	0,282	0,404	0,498	0,589	0,681	0,753	0,818	0,900	0,992	1,086	1,197	1,380	1,631	1,897	2,155	2,430	2,648

Продовження таблиці Б.19

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	27-66	28-67	29-68	30-69	31-70	32-71	33-72	34-73	35-74	36-75	37-76	38-77	39-78	40-79	41-80	42-81	43-82	44-83	45-84	46-85	47-86	48-87	49-88	50-89	51-90	52-91
1	26,844	27,565	28,674	30,682	31,861	31,921	32,220	34,137	34,967	34,259	33,520	35,513	36,314	35,396	33,291	32,428	34,181	34,592	34,402	35,409	36,365	36,357	36,406	36,430	36,430	36,406
2	24,624	26,400	27,657	27,698	28,318	29,876	30,919	29,997	29,912	31,200	32,196	29,974	28,466	28,455	30,014	31,149	30,214	30,831	32,454	33,222	33,456	33,361	33,157	33,010	33,010	33,157
3	16,799	15,857	16,610	16,946	16,505	15,586	16,123	17,125	17,689	17,580	17,031	16,462	16,574	17,910	19,237	19,969	20,064	19,502	18,140	16,497	15,784	15,935	16,054	16,120	16,120	16,054
4	14,966	14,860	13,215	12,875	13,471	14,172	13,275	12,187	11,872	12,290	13,172	14,303	15,158	15,050	14,631	14,047	13,588	13,563	13,929	14,338	14,395	14,346	14,383	14,440	14,440	14,383
5	8,110	8,312	7,824	6,241	4,389	3,626	3,702	3,414	2,725	1,918	1,283	1,204	1,256	1,203	1,089	0,940	0,756	0,764	0,764	0,535	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	6,058	4,574	3,716	3,396	3,438	2,909	1,919	1,347	1,080	1,016	1,084	0,911	0,748	0,680	0,640	0,632	0,673	0,511	0,311	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0,472	0,412	0,423	0,419	0,396	0,369	0,344	0,331	0,346	0,344	0,365	0,381	0,403	0,389	0,366	0,375	0,313	0,236	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,390	0,404	0,377	0,351	0,330	0,316	0,314	0,325	0,319	0,336	0,343	0,362	0,339	0,328	0,336	0,267	0,211	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,291	0,286	0,267	0,243	0,220	0,203	0,191	0,200	0,196	0,207	0,209	0,225	0,213	0,227	0,215	0,192	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,246	0,225	0,210	0,198	0,188	0,183	0,190	0,185	0,192	0,189	0,200	0,193	0,204	0,195	0,180	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,199	0,188	0,177	0,164	0,152	0,142	0,142	0,144	0,151	0,151	0,160	0,169	0,172	0,166	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,163	0,153	0,145	0,139	0,134	0,132	0,136	0,142	0,140	0,147	0,156	0,158	0,155	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,141	0,136	0,131	0,126	0,123	0,126	0,131	0,131	0,136	0,138	0,146	0,144	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,123	0,118	0,114	0,111	0,112	0,114	0,118	0,119	0,123	0,127	0,135	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,112	0,109	0,107	0,106	0,109	0,110	0,113	0,114	0,120	0,098	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,102	0,100	0,099	0,098	0,102	0,104	0,108	0,097	0,033	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,095	0,095	0,095	0,096	0,100	0,093	0,054	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,090	0,091	0,092	0,093	0,048	0,020	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,087	0,089	0,065	0,016	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,085	0,027	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
sum 7-20	2,596	2,433	2,305	2,160	2,018	1,912	1,842	1,794	1,756	1,737	1,714	1,632	1,486	1,305	1,097	0,834	0,524	0,236	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

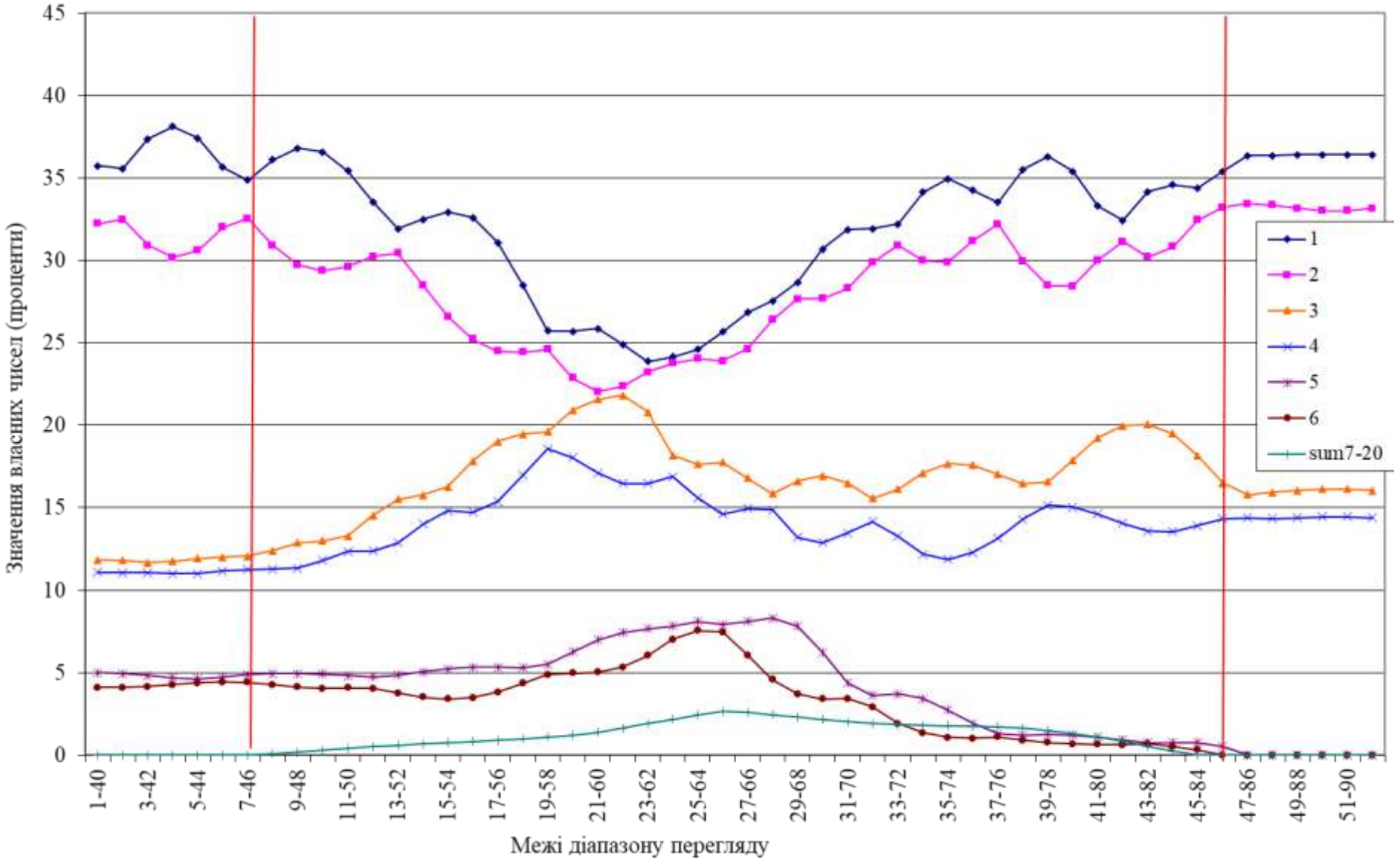


Рисунок Б.28 – Динаміка власних чисел (test 1.3, діапазон перегляду D=40, довжина вікна L=20)

Таблиця Б.20 – Значення власних чисел коваріаційної матриці під час руху діапазону перегляду (test 1.4, D=40)

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	1-40	2-41	3-42	4-43	5-44	6-45	7-46	8-47	9-48	10-49	11-50	12-51	13-52	14-53	15-54	16-55	17-56	18-57	19-58	20-59	21-60	22-61	23-62	24-63	25-64	26-65
1	37,377	35,546	35,491	37,121	37,739	37,094	35,580	34,489	35,833	36,905	37,118	36,314	34,680	34,236	35,890	37,046	36,926	35,427	33,418	33,824	35,291	35,679	34,762	33,010	31,528	32,650
2	30,395	32,242	32,482	31,028	30,369	30,801	32,092	32,972	31,389	30,055	29,583	30,105	31,368	31,389	29,390	27,977	27,729	28,644	30,086	29,393	27,777	27,053	27,443	28,780	30,111	28,947
3	11,888	11,919	11,818	11,851	11,970	12,020	12,079	12,315	12,527	12,587	12,663	12,916	13,131	13,243	13,421	13,634	13,747	13,911	14,228	14,407	14,443	14,627	14,931	15,122	15,243	15,350
4	11,122	11,129	11,129	11,014	10,981	11,106	11,225	11,180	11,222	11,470	11,708	11,777	11,946	12,263	12,450	12,509	12,726	13,054	13,218	13,307	13,445	13,593	13,752	13,898	13,918	13,942
5	5,070	5,008	4,881	4,723	4,613	4,645	4,761	4,862	4,917	4,918	4,866	4,777	4,671	4,568	4,529	4,580	4,667	4,772	4,861	4,902	4,899	4,883	4,861	4,802	4,674	4,573
6	4,148	4,157	4,199	4,261	4,327	4,335	4,258	4,174	4,099	4,049	4,042	4,089	4,180	4,276	4,292	4,222	4,167	4,149	4,138	4,109	4,079	4,093	4,178	4,312	4,448	4,458
7	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,006	0,006	0,006	0,006	0,005	0,005	0,006	0,006	0,007	0,010	0,013	0,017	0,019	0,020	0,020	0,020	0,018	0,016	0,017
8	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,003	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007	0,008	0,010	0,012	0,012	0,011	0,012	0,013	0,013
9	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,003	0,004	0,004	0,005	0,004	0,005	0,005	0,005	0,006	0,007	0,007	0,008	0,009	0,010	0,010	0,011	0,011
10	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,006	0,006	0,006	0,007	0,007
11	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,005	0,005	0,005	0,006	0,006
12	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,004	0,004	0,004	0,004
14	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
15	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003
16	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003	0,003	0,003
17	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,003
18	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002
19	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,002	0,002
20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002
sum 7-20	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,005	0,009	0,013	0,016	0,020	0,021	0,023	0,025	0,029	0,031	0,035	0,043	0,052	0,058	0,064	0,071	0,074	0,075	0,078	0,080

Продовження таблиці Б.20

номер власн. числа	Межі діапазону перегляду																								
	27-66	28-67	29-68	30-69	31-70	32-71	33-72	34-73	35-74	36-75	37-76	38-77	39-78	40-79	41-80	42-81	43-82	44-83	45-84	46-85	47-86	48-87	49-88	50-89	51-90	52-91
1	33,630	33,761	33,064	31,713	31,590	33,133	34,042	33,711	32,073	31,158	32,756	33,763	33,235	31,334	29,736	30,866	31,916	31,843	30,854	29,466	29,159	30,499	31,449	31,715	31,158	29,982
2	27,849	27,557	28,191	29,518	29,537	27,845	26,826	26,962	28,079	28,238	25,985	24,500	24,456	25,647	26,732	25,411	24,255	24,235	25,318	26,974	27,551	26,448	25,797	25,925	26,825	28,211
3	15,381	15,502	15,605	15,437	15,142	15,188	15,282	15,050	14,811	15,093	15,239	15,015	15,244	15,633	15,658	15,650	15,984	16,140	16,115	16,199	16,239	16,141	16,043	15,983	15,787	15,524
4	14,113	14,111	13,931	13,941	14,175	14,129	13,946	14,045	14,333	14,291	14,351	14,670	14,637	14,613	14,885	15,029	14,829	14,826	14,904	14,795	14,715	14,764	14,691	14,452	14,397	14,559
5	4,694	4,840	4,997	5,149	5,272	5,347	5,383	5,403	5,429	5,766	6,204	6,535	6,776	6,936	7,009	7,013	6,960	6,828	6,578	6,358	6,434	6,505	6,554	6,567	6,525	6,422
6	4,255	4,152	4,142	4,177	4,228	4,308	4,476	4,790	5,238	5,419	5,432	5,487	5,624	5,812	5,959	6,016	6,046	6,122	6,230	6,206	5,903	5,644	5,465	5,358	5,308	5,301
7	0,017	0,018	0,017	0,017	0,015	0,013	0,010	0,008	0,008	0,008	0,007	0,007	0,007	0,008	0,007	0,008	0,007	0,004	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
8	0,012	0,013	0,013	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	0,007	0,007	0,007	0,006	0,006	0,006	0,007	0,005	0,003	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
9	0,011	0,010	0,009	0,008	0,007	0,006	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0,006	0,007	0,006	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0,006	0,005	0,005	0,005	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,004	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
12	0,004	0,004	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
13	0,004	0,004	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
14	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
15	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
16	0,003	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
17	0,003	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
18	0,002	0,002	0,002	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
19	0,002	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
20	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
sum 7-20	0,078	0,076	0,069	0,064	0,056	0,050	0,044	0,038	0,037	0,034	0,033	0,031	0,027	0,024	0,021	0,016	0,010	0,005	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000

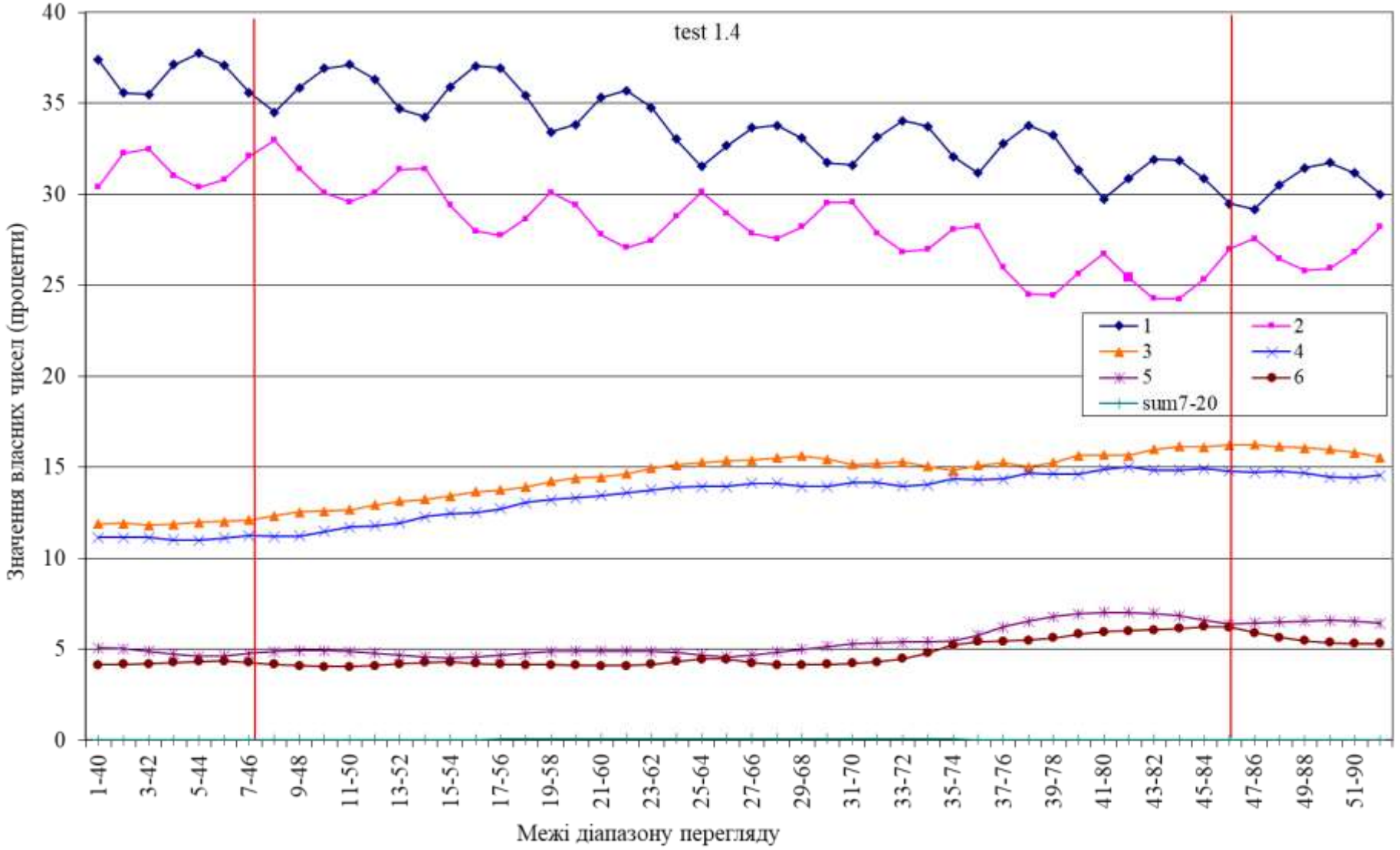


Рисунок Б.29 – Динаміка власних чисел (test 1.4, діапазон перегляду D=40, довжина вікна L=20)

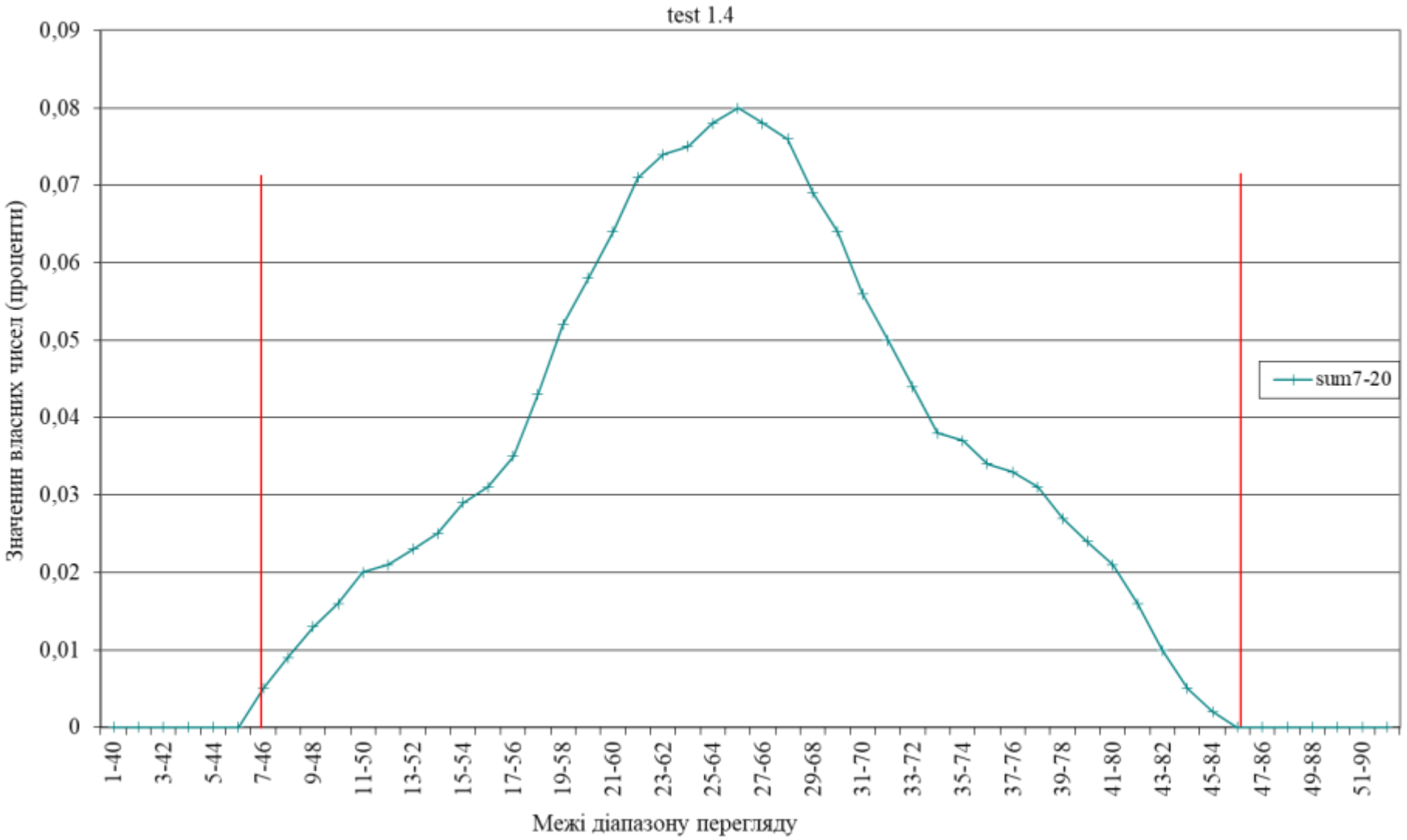


Рисунок Б.30 – Динаміка розладної компоненти, test 1.4 (сума власних чисел із номерами 7-20).

Додаток В Перевірка методу визначення розладки на тестовому прикладі із слабою роздільністю

Додаток В1 Аналіз роздільності часового ряду для тестового прикладу test 2 (слабка роздільність)

Наведено аналіз роздільності часового ряду для тестового прикладу test 2 (має місце слабка роздільність).

Ряд $y_{test2.1}$ є сумою трьох структурних складових: $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$, $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$, $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$).

Ряд $y_{test2.2}$ є сумою чотирьох структурних складових: $y_0 = \frac{t}{8}$, $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$, $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$, $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$).

При розкладанні ряду на структурні складові використали програмний продукт Caterpillar [119].

Додаток В2 Аналіз тестового прикладу test_2_1

Ряд $y_{test2.1}$ є сумою трьох структурних складових: $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$, $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$, $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$).

Результати представлені на рис. В.31 – В.45.

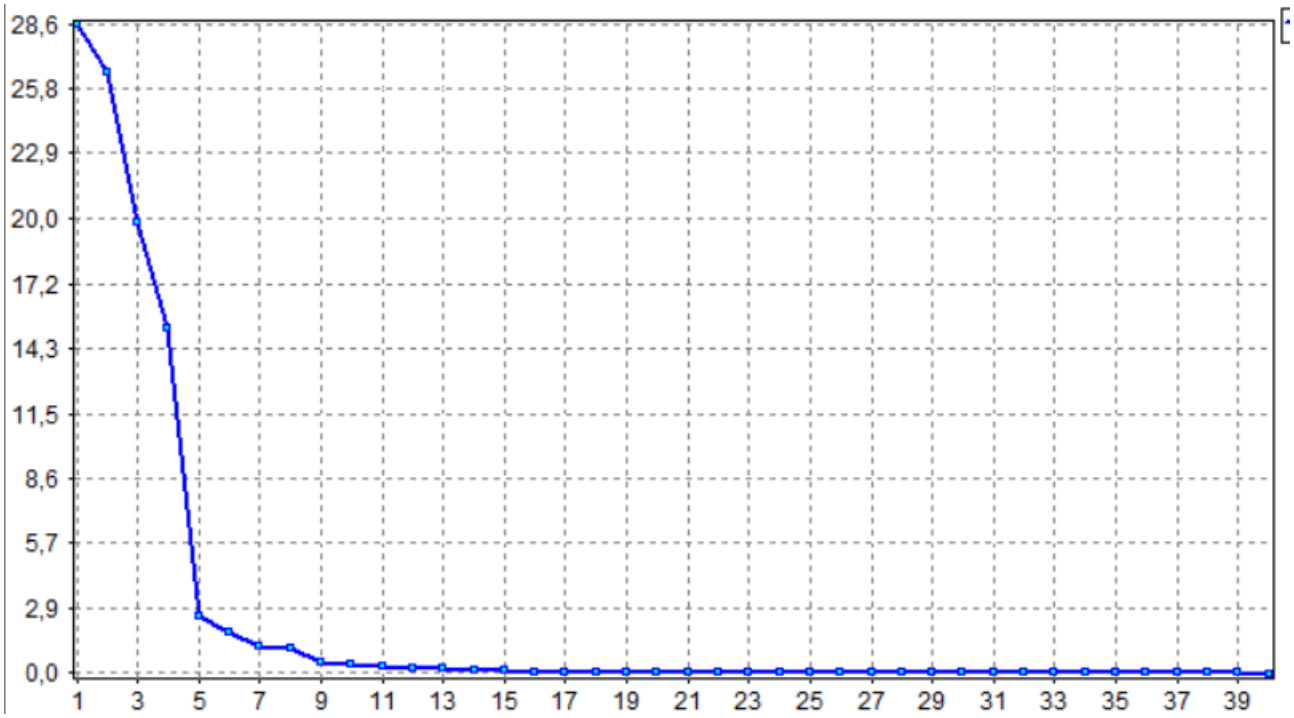


Рисунок В.31 – Значення власних чисел (у відсотках), що одержані при сингулярному розкладанні часового ряду $y_{test2.1}$

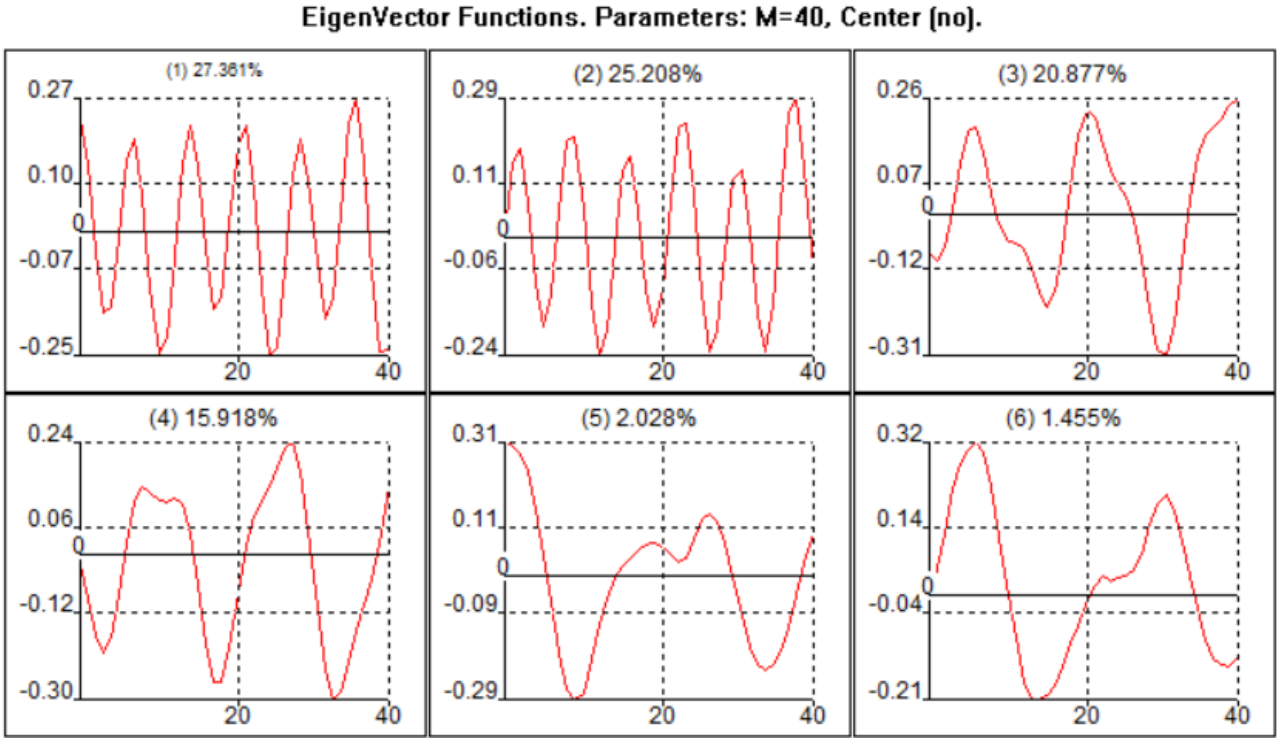


Рисунок В.32 – Власні вектори, отримані при сингулярному розкладі часового ряду $y_{test2.1}$

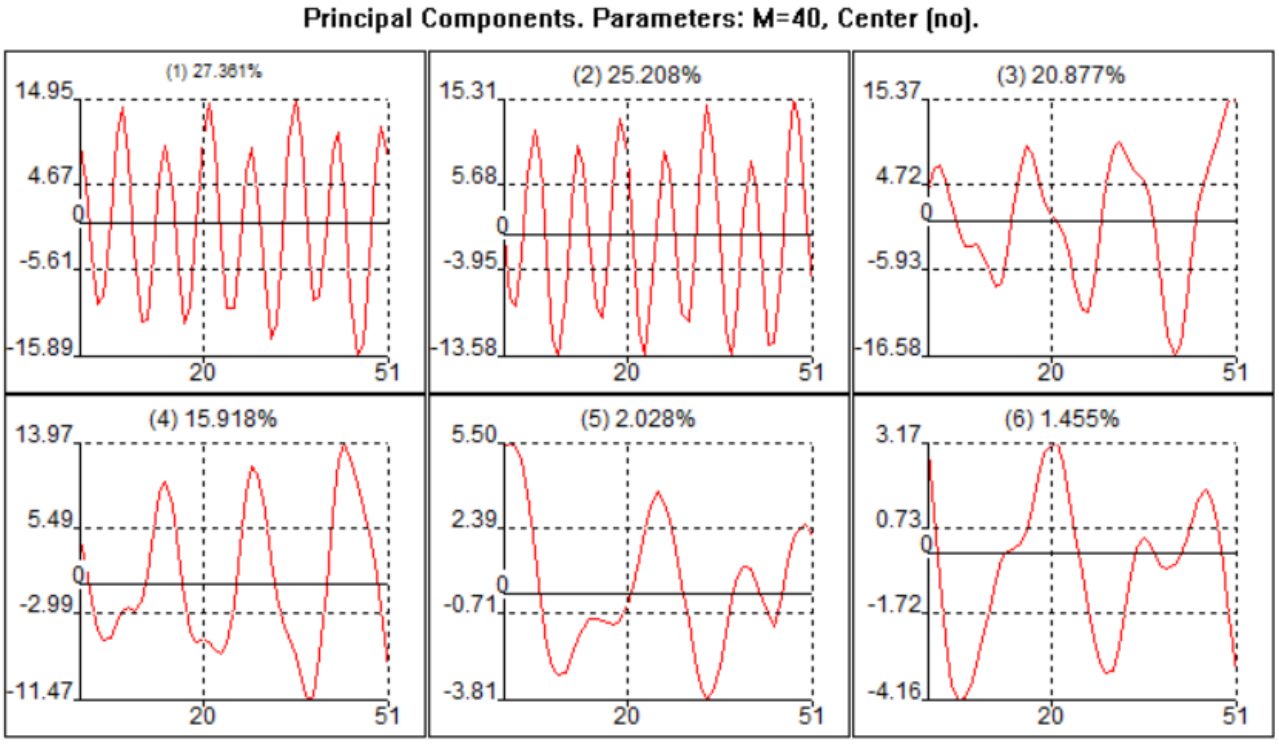


Рисунок В.33 – Головні компоненти, одержані при сингулярному розкладанні часового ряду $y_{test2.1}$

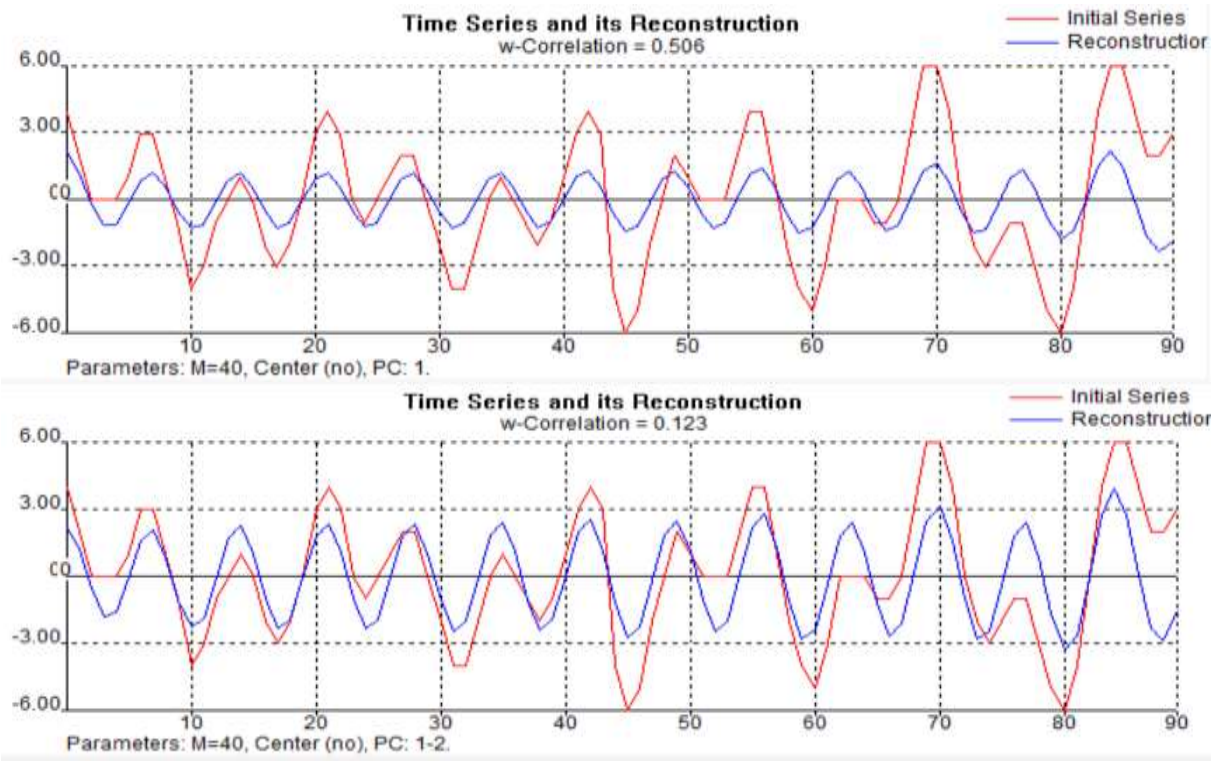


Рисунок В.34 – Відновлення часового ряду $y_{test2.1}$ по першій власній трійці (вилучення структурної компоненти $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$)

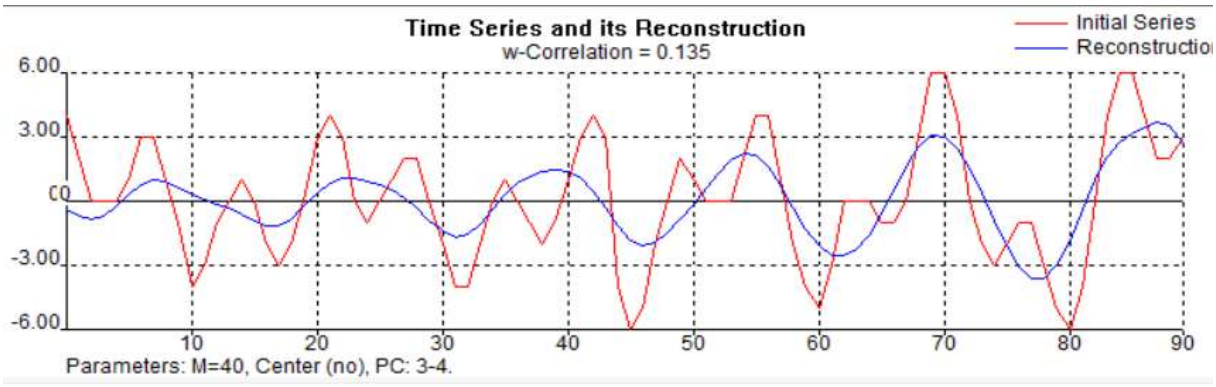


Рисунок В.35 – Відновлення часового ряду $y_{test2.1}$ по парі 3-й і 4-й власних трійок (вилучення структурної компоненти $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$)

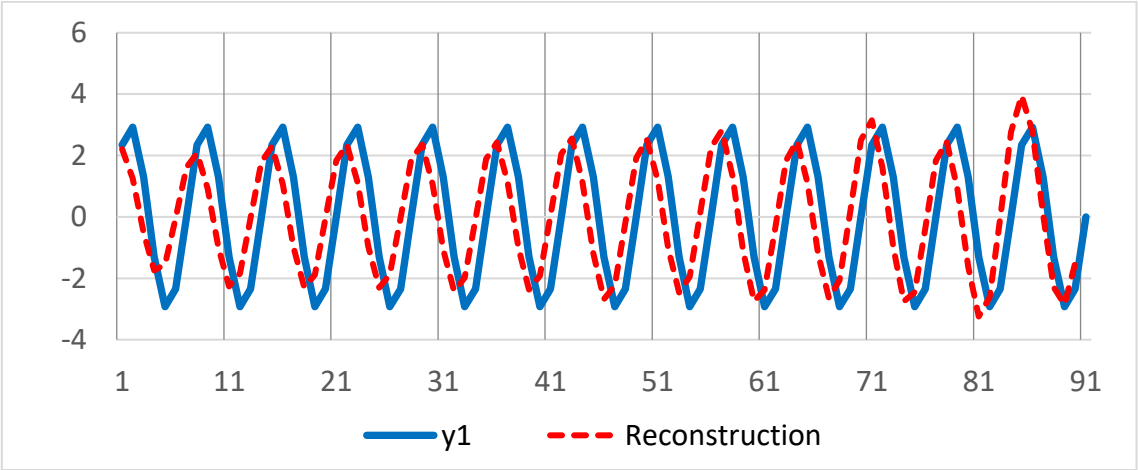


Рисунок В.36 – Порівняння вилученої за методом сингулярно-спектрального аналізу структурної компоненти y_1 з вихідною структурною складовою $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$

Додаток В3 Аналіз тестового прикладу test_2_2

Наведено аналіз роздільності часового ряду для тестового прикладу test 2 (має місце слабка роздільність).

Ряд $y_{test2.2}$ є сумою чотирьох структурних складових: $y_0 = \frac{t}{8}$, $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$, $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$, $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$).

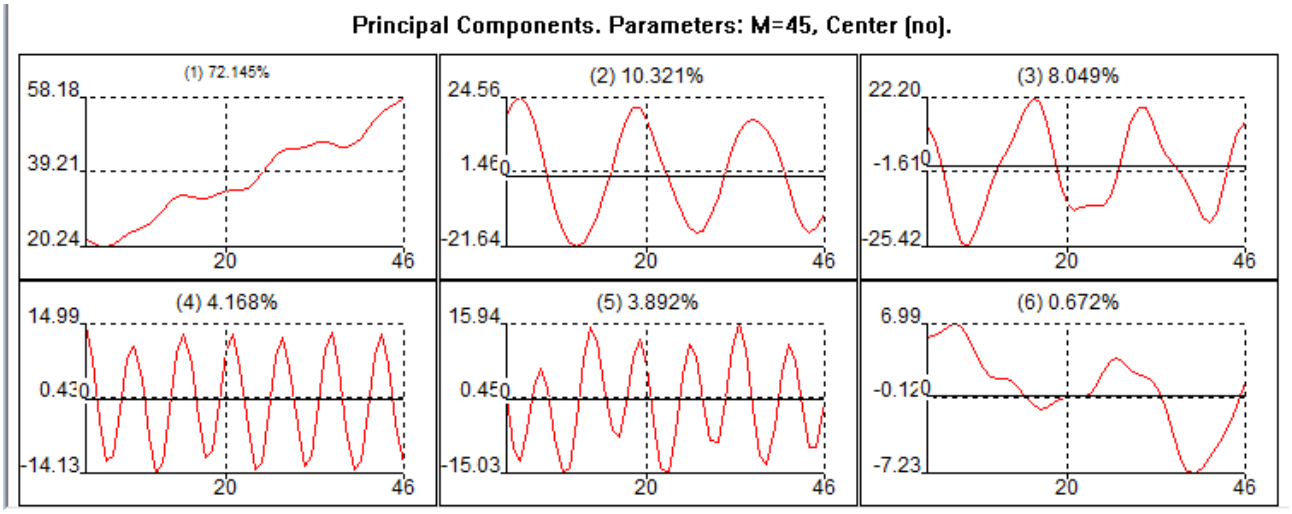


Рисунок В.37 – Головні компоненти, одержані при сингулярному розкладанні часового ряду $y_{test2.2}$.

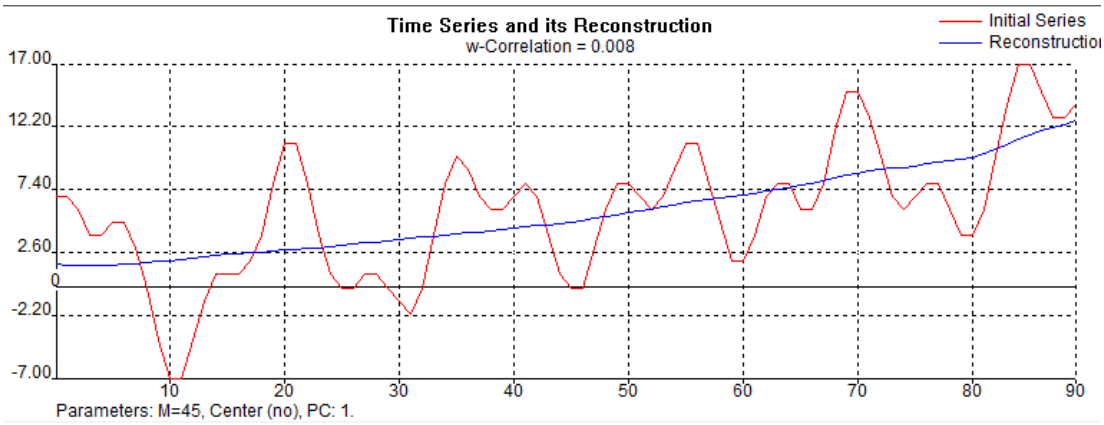


Рисунок В.38 – Відновлення часового ряду $y_{test2.2}$ по першій власній трійці (вилучення структурної компоненти $y_0 = \frac{t}{8}$)

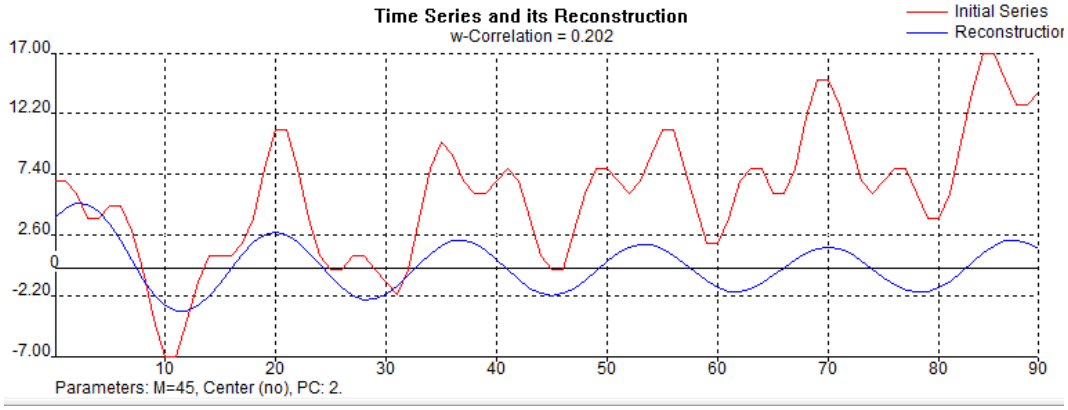


Рисунок В.39 – Відновлення часового ряду $y_{test2.2}$ по другій власній трійці (вилучення структурної компоненти $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$)

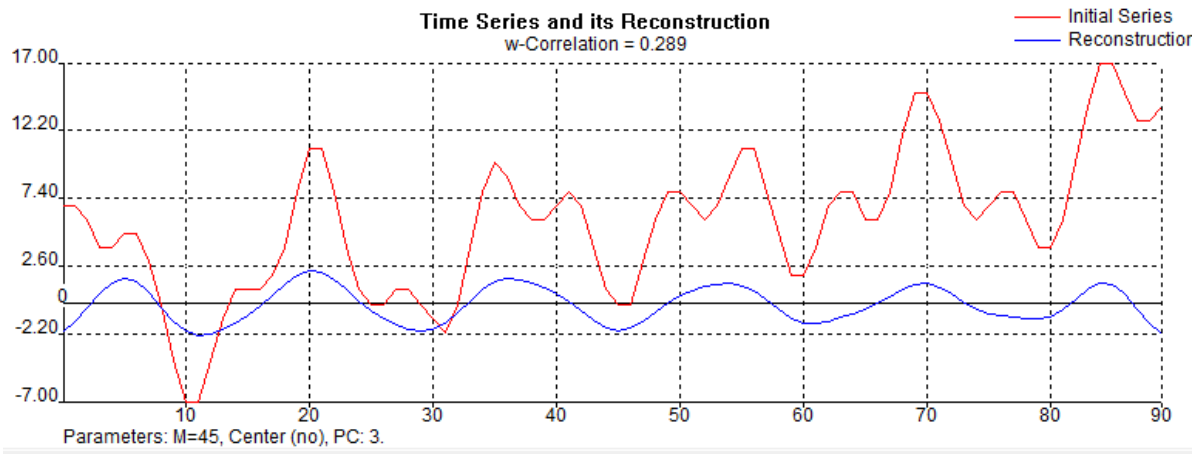


Рисунок В.40 – Відновлення часового ряду $y_{test2.2}$ по третьей собственной тройке (вилучення структурної компоненти $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$)

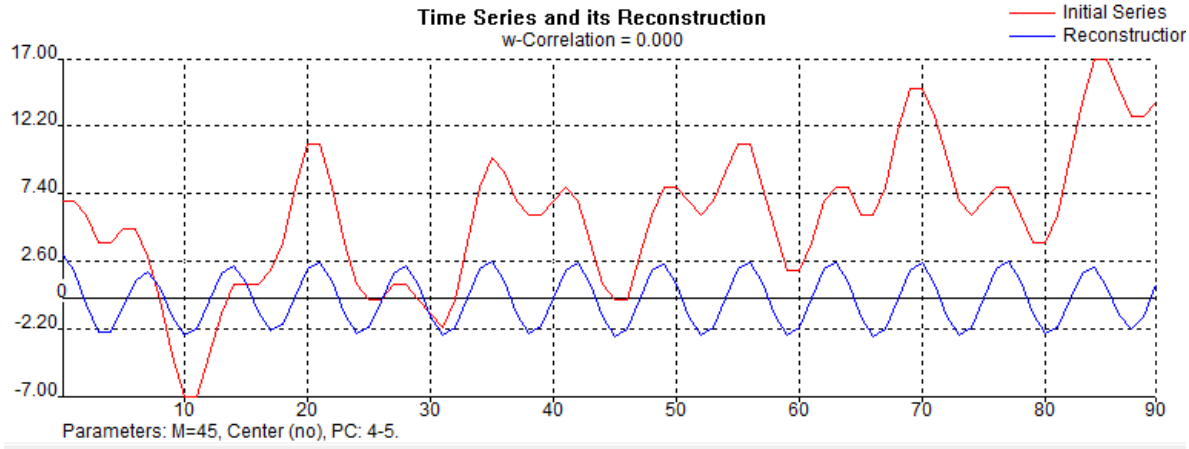


Рисунок В.41 – Відновлення часового ряду $y_{test2.2}$ по парі 4-ої та 5-ої власних трійок (вилучення структурної компоненти $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$)

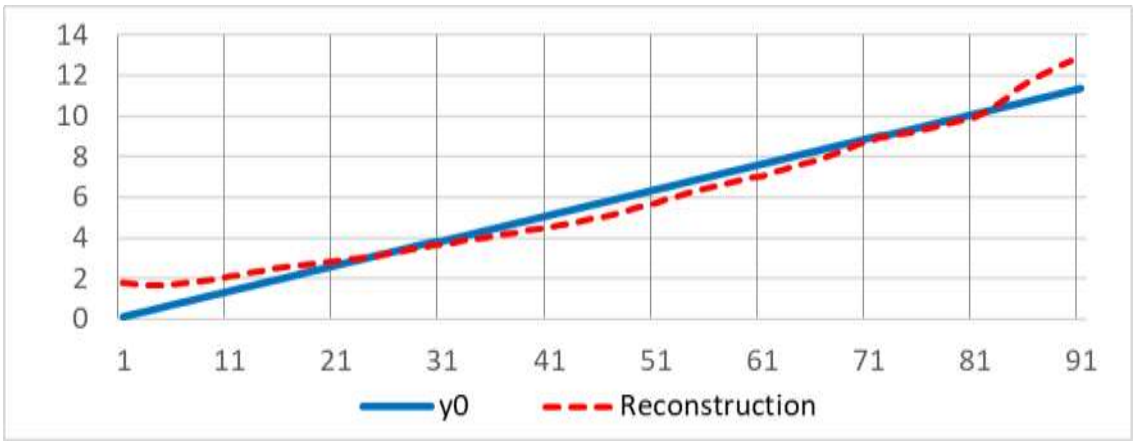


Рисунок В.42 – Порівняння вилученої структурної компоненти y_0 з вихідною структурною складовою $y_0 = \frac{t}{8}$

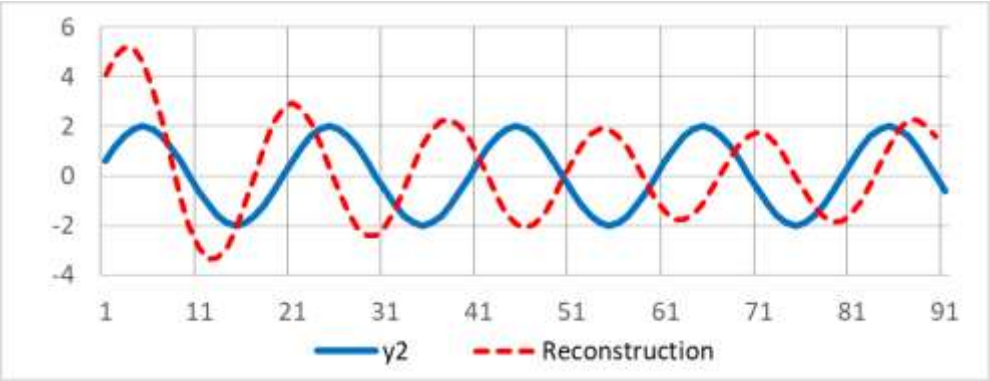


Рисунок В.43 – Порівняння вилученої структурної компоненти y_2 з вихідною структурною складовою $y_2 = 2\,sin\left(\frac{2\pi}{20}t\right)$

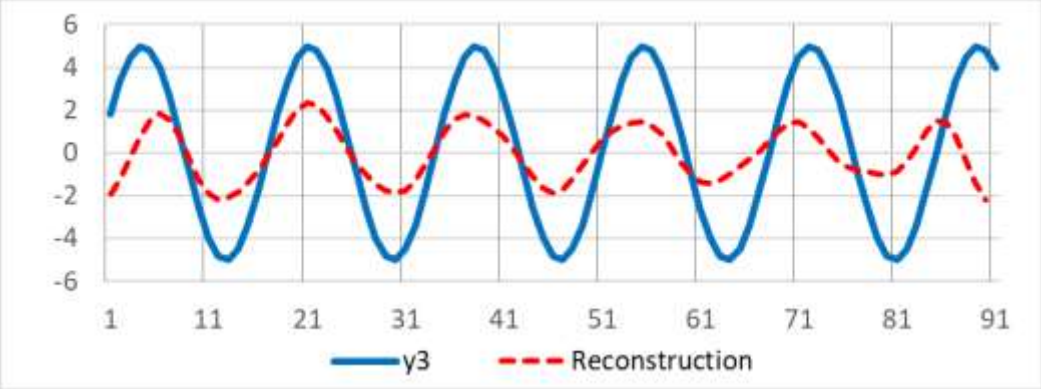


Рисунок В.44 – Порівняння вилученої структурної компоненти y_3 з вихідною структурною складовою $y_3 = 5\,sin\left(\frac{2\pi}{17}t\right)$

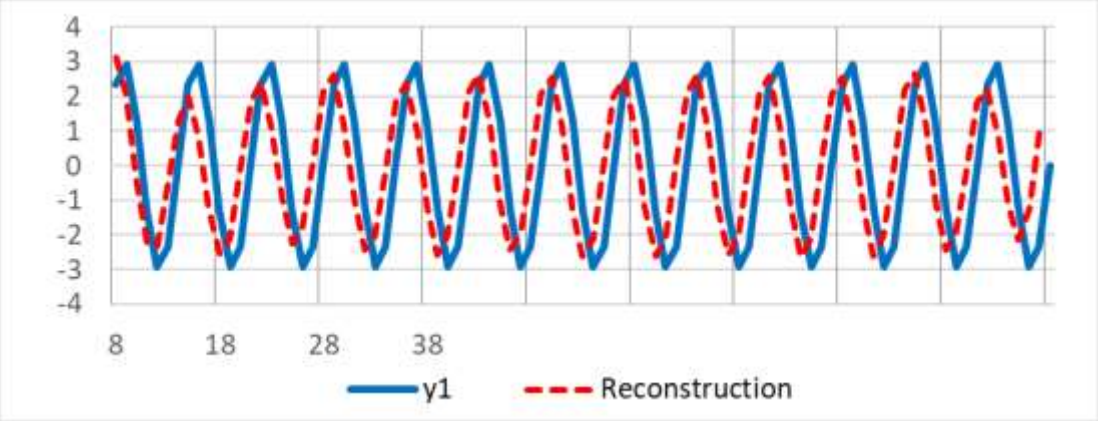


Рисунок В.45 – Порівняння вилученої структурної компоненти y_1 з вихідною структурною складовою $y_1 = 3\,sin\left(\frac{2\pi}{7}t\right)$

Додаток Г Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації:

1 **Кауркін, Є. О.** НИЗЬКА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ У МЕРЕЖІ ЖИВЛЕННЯ НАСОСНИХ СТАНЦІЙ ТЕПЛОПОСТАЧАЮЧОГО ПІДПРИЄМСТВА. Праці Таврійського державного агротехнологічного університету імені Дмитра Моторного, Vol 25, no 2, May 2025, pp 37-44, doi:10.32782/2078-0877-2025-25-2-4. (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 **КАУРКІН, Є.**; КАРПАЛЮК, І. Використання сингулярного аналізу для визначення часу і величини надспоживання електричної енергії. Системні дослідження в енергетиці, n. 2 (86), p. 31-41, 30 Трав 2026. https://doi.org/10.15407/srenergy2026.02.031 (Фахове видання категорії Б)

URL: https://systemre.org/index.php/journal/article/view/956

(Наказ МОН України № 928 від 11.06.2026, Б)

3 Detection of Corona Discharge in Power Supply System Sokol, Y., Babak, V., Zaporozhets, A., Gryb, O., Karpaliuk, I., **Kaurkin, Y**. Studies in Systems, Decision and Control., 2024, 509, pp. 43–56 https://doi.org/10.1007/978-3-031-44025-0_3 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-44025-0_3

Electronic ISSN 2198-4190

Print ISSN 2198-4182

Print ISBN 978-3-031-44024-3

Online ISBN 978-3-031-44025-0

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

4 Economic Effect of the Use of the Method of Diagnosing the State of Power Lines at the Expense of UAVs Gryb, O., Karpaliuk, I., Babak, V., Starenkiy, V., Zaporozhets, A., **Kaurkin, Y**. Studies in Systems, Decision and Control., 2024, 509, pp. 201–226 DOI: 10.1007/978-3-031-44025-0_10 (SCOPUS (Q4), Switzerland)

URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-44025-0_10

Electronic ISSN 2198-4190

Print ISSN 2198-4182

Print ISBN 978-3-031-44024-3

Online ISBN 978-3-031-44025-0

5 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)

6 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)

7 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. Вощинський, 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 політехнічних інститут» як монографію зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Протокол №8 від 03.09.2021р.)

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. Вощинський, 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 політехнічних 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. Лісіченко, 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 політехнічних 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 політехнічних інститут» протокол №01 від 27.01.2023р., як монографію зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.)

11 **Кауркін Є.О.**, Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., Вплив провалів напруги на роботу станцій підкачки теплоносія / 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. 74

https://ndch.kpi.kharkov.ua/wp-content/uploads/2025/01/Zbirnik-tez-MicroCAD-2022.pdf

12 **Кауркін Є.О.**, Гриб О. Г., Карпалюк І. Т., ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖ МІСТА / 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. 5-6

https://repo.btu.kharkiv.ua/items/9d91df2d-68d8-4815-b9be-36cf41216e88

Додаток Д Акти впровадження

ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор технічний
Ігор СІРЕНКО

« 01 » травня 2025р.

АКТ

Про впровадження результатів дисертаційної роботи
Кауркіна Євгена Олексійовича

«Методи і засоби зменшення впливу провалів напруг на технічні комплекси підприємств теплопостачання»

Цим актом підтверджується, що у 2025 році використано результати, що отримані в дисертаційній роботі **Кауркіна Євгена Олексійовича «Методи і засоби зменшення впливу провалів напруг на технічні комплекси підприємств теплопостачання»**, впроваджені при проведенні моніторингу якості електроенергії на ПС 110 кВ.

На шинах ПС 110 кВ зафіксовано наявність провалів напруги. Причиною провалів напруги 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 пов'язаності використання енергії споживачем, а саме заміщення недостатньої величини теплової енергії електричною енергією.

Головний енергетик **Вадим СИЛКА**

ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ
«СЛОБОДА-БУДЕЛЕКТРОМОНТАЖ»

61037, вул. Георгія Тарасенка, 126, офіс 226, м. Харків
IBAN: UA 47 305299 00000 26008015906019 в АТ КБ «ПриватБанк»,
МФО 305299, ЄДРПОУ 34392037
Email: elektrosety7@gmail.com

АКТ

про практичне впровадження результатів дослідження

Кауркіна Євгена Олексійовича

методи і засоби зменшення впливу провалів напруг на технічні комплекси підприємств теплопостачання

ТОВ «СЛОБОДА-БУДЕЛЕКТРОМОНТАЖ» (м.Харків) засвідчує високий рівень теоретичних та аналітичних положень досліджень Кауркіна Є.О., використаних при розробці **методів і засобів зменшення впливу провалів напруг на технічні комплекси підприємств теплопостачання** і доцільність впровадження методів пов'язаності якості електричної енергії із обсягами відпущеного тепла споживачам. Крім того, розроблене програмне забезпечення було використане для аналізу подій розладки в даних замірів якості електричної енергії, що пояснюється недостатнім рівнем теплової комфортності споживачів, які і призводять до наднормативного споживання електричної енергії і як наслідок до погіршення якості електричної енергії.

Директор
ТОВ «СЛОБОДА-
БУДЕЛЕКТРОМОНТАЖ» Олександр Семибратський
11 вересня 2025 підпис МП

ТОВАРИСТВО З ОМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «ТЕХЕКС-ГАЗ»
Адреса: 61052, Україна, місто Харків,
провулок Мало-Панасівський, будинок 4/7, кімната 307
Код за ЄДРПОУ: 34630463
ІПН: 346304620332
тел.: +38 (050) 400 99 40
e-mail: gas@tekhex.com
https://tekhexgas.com.ua/

АКТ
про практичне впровадження результатів дослідження Кауркіна Євгена Олексійовича тема: Методи і засоби зменьшення впливу провалів напруг на технічні комплекси підприємств теплопостачання

ТОВ «ТЕХЕКС-ГАЗ» засвідчує, що експертна група компанії розглянула матеріали дисертації Кауркіна Є.О., і відзначає високий рівень теоретичних та аналітичних положень дослідження і доцільність впровадження методу контроля наявності провалів напруги в мережі.

Дослідником було запропоновано спосіб застосування представленого методу виявлення провалів напруги в електричній мережі одного із підрозділів підприємства. Метод був використаний для аналізу даних теплової і електричної енергії. За результатами аналізу було розроблено ряд рекомендацій які дозволили зменшити провали напруги в електричній мережі і покращити умови роботи електричного обладнання, насамперед асинхронних двигунів. Пропозиції здобувача враховуються в роботі підприємства при проектуванні і виконанні ремонтних робіт, а також заплановано їх використання під час модернізації технологічних циклів підприємства.

З Повагою, Директор Юзеф БРОНЕВСЬКИЙ
« 07 » грудня 2025 року

(підпис) МП