

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Інженерно-технологічний факультет
Кафедра енергетики та електротехнічних систем

До захисту
Допускається
В.о. завідувача кафедри

Олександр ЮРЧЕНКО

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
за магістерським рівнем вищої освіти

На тему: «Підвищення ефективності системи енергозабезпечення
ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни Сумської області»

Виконав

(підпис)

Антон КРИЖНИЙ

Група

ЕТЕС 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Віктор СІРЕНКО

Рецензент:

(підпис)

Олена ДОВЖИК

Суми – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
СУМСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет **інженерно-технологічний**

Кафедра **енергетики та електротехнічних систем**

Ступінь вищої освіти «**Магістр**»

Спеціальність **141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»**

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

енергетики та електротехнічних систем

Андрій ЧЕПЖНИЙ

«5» вересня 2024 року

З А В Д А Н Н Я
на кваліфікаційну роботу

Антону КРИЖНОМУ
(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Підвищення ефективності системи енергозабезпечення ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни Сумської області»
2. Керівник кваліфікаційної роботи: Сіренко Віктор Федорович, к.т.н., доцент
3. Строк подання здобувачем роботи: «14» листопада 2025 року.
4. Вихідні дані до роботи: Річні звіти базового підприємства, нормативно-технічна документація, наукові та літературні джерела, методичні рекомендації до виконання роботи.
5. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ; 1. Аналіз системи електропостачання та шляхів підвищення її ефективності шляхом покращення якості електроенергії; 2. Дослідження показників якості електроенергії та розробка рекомендацій щодо їх покращення; 3. Охорона праці; 4. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.
6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Віктор СІРЕНКО

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)

Антон КРИЖНИЙ

(Ім'я ПРИЗВИЩЕ)

Дата отримання завдання «5» вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів	Примітка
1.	Збір інформації про діяльність господарства	до 02.08.2025 р.	
2.	Аналіз літературних джерел з обраної тематики	до 16.08.2025 р.	
3.	Складання плану роботи	до 21.08.2025 р.	
4.	Написання вступу	до 24.08.2025 р.	
5.	Підготовка розділу «Розділ 1. Аналіз системи електропостачання та шляхів підвищення її ефективності шляхом покращення якості електроенергії»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Дослідження показників якості електроенергії та розробка рекомендацій щодо їх покращення»	до 03.10.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
9.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
10.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
11.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
12.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Віктор СІРЕНКО

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Віталій ШКАРУПА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Крижний А. О. Підвищення ефективності системи енергозабезпечення ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни Сумської області.

Кваліфікаційна робота на здобуття магістра за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Сумський національний аграрний університет, Суми, 2025.

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності системи електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни шляхом покращення показників якості електроенергії та впровадження сучасних технічних засобів регулювання й компенсації електричних параметрів. Актуальність теми зумовлена зростанням частки нелінійних і несиметричних навантажень у промислових мережах, що призводить до погіршення якості електроенергії, перевищення втрат потужності, зниження ресурсу електротехнічного обладнання та підвищення витрат на електроенергію.

Метою роботи є підвищення ефективності системи електропостачання підприємства на основі комплексного аналізу параметрів якості електроенергії, визначення причин їх відхилень і розроблення технічно та економічно обґрунтованих заходів з їх покращення.

У першому розділі виконано аналіз структури електропостачання ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс». Встановлено, що живлення підприємства здійснюється від двох трансформаторів ТМ-250, які формують розподільчу мережу 0,4 кВ. Проведено оцінку основних споживачів і режимів роботи, проаналізовано вплив показників якості електроенергії – напруги, частоти, коефіцієнта гармонічних спотворень (THD), несиметрії та флікера – на ефективність роботи обладнання.

У другому розділі подано результати експериментальних вимірювань,

виконаних аналізатором якості електроенергії UNI-T UT285C відповідно до стандартів ІЕС 61000-4-30, ІЕС 61000-4-7 і ДСТУ EN 50160:2020. Встановлено, що напруга в мережі зазнає коливань у межах від -18% до $+14\%$ від номінального значення, рівень гармонічних спотворень досягає $9,3\%$, коефіцієнт несиметрії струмів – $9,5\%$, а тривала доза флікера перевищує норматив у вечірні години. Ці відхилення зумовлюють збільшення втрат електроенергії, перегрів трансформаторів і нестабільність роботи технологічного обладнання.

Розроблений комплекс технічних заходів передбачає балансування фазових навантажень, установлення автоматичної установки компенсації реактивної потужності, впровадження активного фільтра гармонік та використання стабілізатора або динамічного відновлювача напруги. Запропоновані рішення дають змогу зменшити втрати електроенергії на $6-8\%$, підвищити коефіцієнт потужності до $0,96-0,98$, знизити рівень гармонічних спотворень удвічі та забезпечити стабільність напруги в межах $\pm 3\%$.

Економічне обґрунтування показало, що загальна вартість впровадження заходів становить $0,76$ млн грн, а очікувана щорічна економія – $0,7$ млн грн, що забезпечує термін окупності близько одного року.

Результати дослідження підтвердили ефективність запропонованого комплексу технічних і організаційних рішень, які дозволяють підвищити надійність і ефективність системи електропостачання підприємства, зменшити енергетичні витрати, покращити якість електроенергії відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2020 та створити передумови для сталого розвитку виробництва.

Ключові слова: система електропостачання, якість електроенергії, гармонічні спотворення, несиметрія напруги, флікер, коефіцієнт потужності, компенсація реактивної потужності, активний фільтр гармонік, стабілізатор напруги, динамічний відновлювач напруги, енергоефективність, електробезпека, економічна ефективність, ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс».

ABSTRACT

Kryzhnyi A. O. Improving the Efficiency of the Power Supply System of Techno-Bio-Energy-Service LLC, Romny, Sumy Region.

Qualification work for a master's degree in the educational programme “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics” in the speciality 141 “Electric Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics”. Sumy National Agrarian University, Sumy, 2025.

The qualification thesis is devoted to improving the efficiency of the power supply system of LLC “Techno-Bio-Energo-Service” in Sumy by enhancing power quality indicators and implementing modern technical means for voltage regulation and compensation of electrical parameters. The relevance of the topic is determined by the increasing share of nonlinear and unbalanced loads in industrial networks, which leads to power quality deterioration, higher energy losses, reduced lifespan of electrical equipment, and increased electricity costs.

The purpose of the work is to improve the efficiency of the enterprise’s power supply system based on a comprehensive analysis of power quality parameters, identification of the causes of their deviations, and development of technically and economically justified measures for their improvement.

The first section presents an analysis of the power supply structure of LLC “Techno-Bio-Energo-Service.” It was established that the enterprise is powered by two TM-250 transformers forming a 0.4 kV distribution network. The main consumers and their operating modes were analyzed, and the influence of power quality indicators – voltage, frequency, total harmonic distortion (THD), unbalance, and flicker – on the operational efficiency of electrical equipment was evaluated.

The second section provides the results of experimental measurements performed using the UNI-T UT285C power quality analyzer in accordance with IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7, and DSTU EN 50160:2020 standards. It was found that the supply voltage fluctuates within the range of –18 % to +14 % of the nominal value,

the harmonic distortion level reaches 9.3 %, the current unbalance factor equals 9.5 %, and the long-term flicker dose exceeds the permissible limit during evening hours. These deviations cause increased energy losses, transformer overheating, and unstable operation of technological equipment.

The developed set of technical measures includes phase load balancing, installation of an automatic reactive power compensation system, implementation of an active harmonic filter, and the use of a voltage stabilizer or dynamic voltage restorer (DVR). The proposed solutions make it possible to reduce energy losses by 6–8 %, increase the power factor to 0.96–0.98, cut harmonic distortion by half, and maintain voltage stability within ± 3 % of the nominal value.

The economic justification showed that the total cost of implementing the proposed measures is 0.76 million UAH, while the expected annual savings amount to 0.7 million UAH, providing a payback period of approximately one year.

The research results confirmed the effectiveness of the proposed set of technical and organizational solutions, which improve the reliability and efficiency of the enterprise's power supply system, reduce energy consumption, ensure compliance with DSTU EN 50160:2020 power quality standards, and create favorable conditions for the sustainable development of production.

Keywords: power supply system, power quality, harmonic distortion, voltage unbalance, flicker, power factor, reactive power compensation, active harmonic filter, voltage stabilizer, dynamic voltage restorer, energy efficiency, electrical safety, economic efficiency, LLC “Techno-Bio-Energo-Service.”

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛЯХОМ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	13
1.1. Загальна характеристика підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс».....	13
1.2. Структура та основні елементи системи електропостачання підприємства.....	15
1.3. Характеристика споживачів та режимів їх роботи.....	17
1.4. Аналіз основних показників ефективності електропостачання.....	19
1.5. Вплив показників якості електроенергії на ефективність роботи обладнання.....	21
1.6. Шляхи підвищення ефективності системи електропостачання через покращення якості електроенергії.....	23
1.7. Висновки до розділу 1.....	26
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЇХ ПОКРАЩЕННЯ	28
2.1. Методика та засоби вимірювання показників якості електроенергії....	28
2.2. Результати вимірювань показників якості електроенергії та їх аналіз .	30
2.2.1. Дослідження показників напруги в мережі.....	30
2.2.2. Дослідження показників частоти електричної мережі.....	32
2.2.3. Дослідження гармонічних спотворень напруги та коефіцієнта THD.....	33
2.2.4. Дослідження несиметрії напруги та струму.....	35

	9
2.2.5. Дослідження короткочасної та тривалої дози флікера	37
2.3. Розробка рекомендацій щодо підвищення якості електропостачання..	41
2.3.1. Балансування фазових навантажень.....	42
2.3.2. Встановлення автоматичних систем компенсації реактивної потужності	44
2.3.3. Фільтрація гармонічних складових	46
2.3.4. Використання стабілізаторів або динамічних відновлювачів напруги	49
2.4. Висновки до розділу 2.....	50
3. ОХОРОНА ПРАЦІ	52
4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ	58
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ.....	61
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	63
ДОДАТКИ	67

ВСТУП

1. Актуальність теми. У сучасних умовах промислового розвитку та підвищення енергоємності технологічних процесів актуальним є питання забезпечення високої надійності й ефективності електропостачання підприємств. Зокрема, для виробничих організацій, які використовують складне електрообладнання, зростає роль параметрів якості електричної енергії (напруга, частота, симетрія, гармоніки, імпульсні перешкоди тощо). Дефіцит якості електроенергії призводить до небажаних наслідків – зменшення ресурсу обладнання, аварійних зупинок, підвищених втрат електроенергії та збитків від простою виробництва [1, 2]. Погіршення показників якості електроенергії безпосередньо впливає на ефективність системи електропостачання: зокрема, збільшується споживання реактивної потужності, зростають теплові втрати, погіршується коефіцієнт потужності, що знижує економічну ефективність роботи підприємства. Додатково, із зростанням застосування нелінійних навантажень (інвертори, випрямлячі, частотні перетворювачі) ситуація ускладнюється, оскільки з'являються гармоніки, які впливають на якість напруги та струму в мережі [3].

Для підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни із значними виробничими навантаженнями, забезпечення високої якості електропостачання стає не лише технічним завданням, але й економічним: покращення якості може сприяти зниженню експлуатаційних витрат, продовженню служби обладнання, підвищенню надійності виробництва і, як наслідок, конкурентоспроможності. Враховуючи всі ці фактори, напрямок підвищення ефективності системи електропостачання через покращення якості електроенергії є своєчасним, практично значущим і має високу потенційну цінність.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. Проблема забезпечення належної якості електроенергії є одним із ключових напрямів сучасних досліджень у галузі електроенергетики. Погіршення параметрів напруги, збільшення гармонійних спотворень і несиметрії у мережах промислових

підприємств призводить до підвищених втрат електроенергії, зниження ефективності систем електропостачання та скорочення ресурсу обладнання [4, 5]. Результати досліджень показують, що зростання кількості нелінійних споживачів, таких як частотні перетворювачі, зварювальні апарати, випрямлячі та зарядні станції електромобілів, створює значний вплив на форму напруги й струму, збільшуючи коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) та погіршуючи коефіцієнт потужності [5, 6]. Для вирішення цих проблем у сучасних роботах пропонуються різні технічні підходи: застосування активних і пасивних фільтрів гармонік, пристроїв компенсації реактивної потужності (STATCOM, SVC), а також впровадження систем моніторингу якості електроенергії в режимі реального часу [6, 7]. У статті [7] наведено узагальнення сучасних міжнародних стандартів (IEC 61000-4-30, IEC 61000-3-6, EN 50160) і рекомендації щодо оцінювання показників якості в системах розподілу. Автори підкреслюють необхідність постійного моніторингу гармонічного складу струмів та напруги, особливо в мережах з підключеними джерелами розподіленої генерації. Водночас Ali M. з колегами [8] зазначає, що вдосконалені стратегії широтно-імпульсної модуляції (PWM) у силових перетворювачах дають змогу значно зменшити рівень гармонік та покращити енергетичну ефективність системи. Загалом аналіз літератури показує, що хоча питання забезпечення якості електроенергії досліджується на різних рівнях – від моделювання електромагнітних процесів до впровадження конкретних технічних засобів, – прикладні аспекти підвищення ефективності системи електропостачання на конкретних промислових підприємствах залишаються недостатньо розробленими.

3. Мета дослідження. Метою магістерської кваліфікаційної роботи є підвищення ефективності системи електропостачання ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни шляхом покращення показників якості електроенергії на основі аналізу поточного стану електричної мережі підприємства, дослідження параметрів напруги та струму і розробки технічних рекомендацій щодо їх оптимізації.

4. Об'єкт дослідження – система електропостачання ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни, яка включає трансформаторну підстанцію, внутрішньозаводські електричні мережі, основні електроприймачі та обладнання, що визначає режим роботи системи.

5. Предмет дослідження – показники якості електроенергії в системі електропостачання підприємства, їх вплив на ефективність роботи електрообладнання та техніко-економічні показники функціонування системи, а також методи і технічні засоби їх покращення.

6. Завдання дослідження. Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити такі основні завдання:

– виконати аналіз існуючої системи електропостачання ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» та визначити шляхи підвищення її ефективності шляхом покращення показників якості електроенергії;

– провести дослідження фактичних показників якості електроенергії підприємства, оцінити їх відповідність нормативним вимогам і розробити рекомендації щодо їх покращення;

– розглянути питання охорони праці під час експлуатації та модернізації системи електропостачання;

– виконати економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованих технічних заходів із підвищення ефективності системи електропостачання.

7. Методи дослідження. У роботі застосовано аналітичні, експериментальні та розрахункові методи дослідження. Аналіз структури системи електропостачання та характеристик споживачів виконано на основі енергетичного аудиту й вивчення технічної документації підприємства.

8. Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг роботи становить 67 сторінок машинописного тексту, містить 15 рисунків, 4 таблиці та 39 найменувань джерел у списку літератури.

1. АНАЛІЗ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТА ШЛЯХІВ ПІДВИЩЕННЯ ЇЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ШЛЯХОМ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1. Загальна характеристика підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс»

Товариство з обмеженою відповідальністю «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» є сучасним підприємством енергетичного профілю, розташованим у місті Ромни. Основними напрямками діяльності компанії є виробництво, постачання та сервісне обслуговування енергетичного обладнання, а також проектування і впровадження інженерних систем у сфері тепло- та електропостачання промислових і комунальних об'єктів. Підприємство виконує повний цикл робіт – від розроблення проектної документації до монтажу, налагодження, введення в експлуатацію й технічного супроводу енергетичних систем.

У структурі підприємства функціонують виробнича дільниця, служба енергопостачання, відділ автоматизації та контролю, а також технічна лабораторія, що здійснює діагностику електрообладнання та контроль якості електроенергії. Основні виробничі потужності розташовані на території промислової зони м. Ромни та живляться від трансформаторної підстанції напругою 10/0,4 кВ. Енергоспоживачами є зварювальні агрегати, компресорні установки, частотно-регульовані електроприводи, системи вентиляції, насоси та допоміжне технологічне обладнання.

Для оцінювання поточного стану підприємства проаналізовано основні фінансові показники за 2020–2024 рр. (рис. 1.1 – 1.3).

Аналіз динаміки показників свідчить про суттєве зменшення обсягів доходу – більш ніж у чотири рази за період 2020–2024 рр. (рис. 1.1), що супроводжується зниженням рентабельності та появою збитків протягом останніх трьох років.

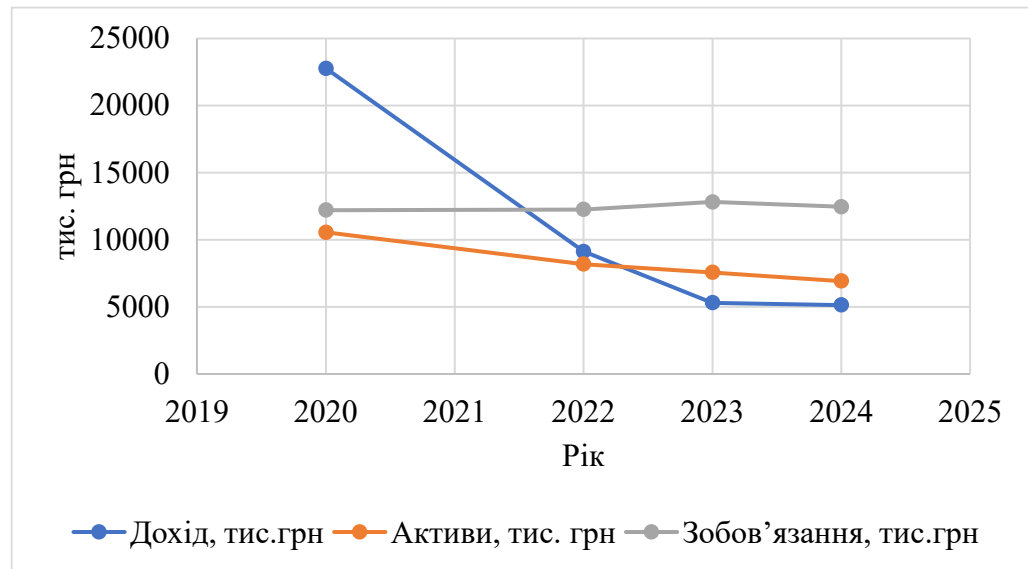


Рис. 1.1. Динаміка основних фінансових показників ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс»

У 2023 р. чистий збиток склав понад 1,1 млн грн, а у 2024 р. зменшився до 0,29 млн грн (рис. 1.2), що може свідчити про часткову стабілізацію після кризового періоду. Зменшення активів (рис. 1.1) (із 10,55 млн грн у 2020 р. до 6,92 млн грн у 2024 р.) та збереження значного рівня зобов'язань (понад 12 млн грн) вказують на потребу в підвищенні енергоефективності та зниженні операційних витрат, зокрема за рахунок раціонального використання електроенергії.

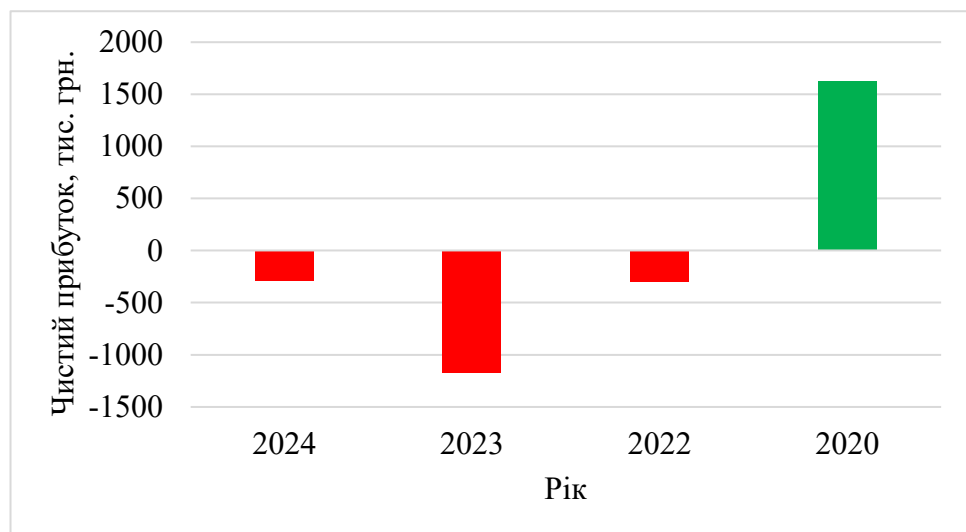


Рис. 1.2. Динаміка чистого прибутку підприємства

Зменшення чисельності персоналу з 36 до 25 осіб (рис. 1.3) також свідчить про оптимізацію ресурсів і скорочення виробничих обсягів, що підвищує актуальність впровадження енергозберігаючих і компенсаційних технологій для стабілізації фінансових показників.

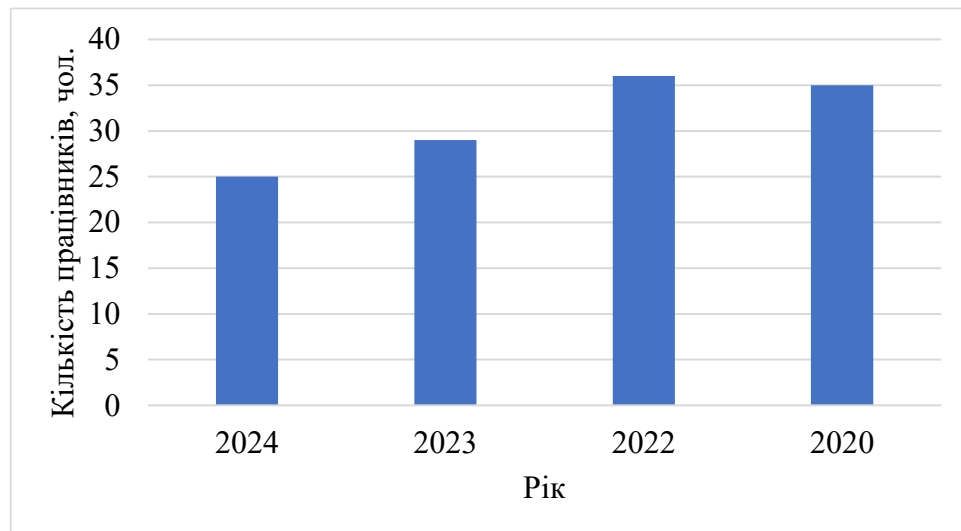


Рис. 1.3. Кількість працівників підприємства по роках

Поліпшення якості електроенергії, зниження втрат і покращення коефіцієнта потужності можуть безпосередньо сприяти зменшенню витрат підприємства на енергоресурси, підвищенню продуктивності та фінансової стійкості.

1.2. Структура та основні елементи системи електропостачання підприємства

Система електропостачання ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» побудована відповідно до вимог ПУЕ та забезпечує живлення як технологічних, так і допоміжних споживачів підприємства. Однолінійна схема електропостачання підприємства наведена на рис. 1.4. Живлення здійснюється від енергосистеми міста Ромни по двом повітряним лініям 6 кВ (ПЛ-6 кВ № 1 та № 2), що забезпечують незалежне підключення та резервування живлення основних виробничих потужностей.

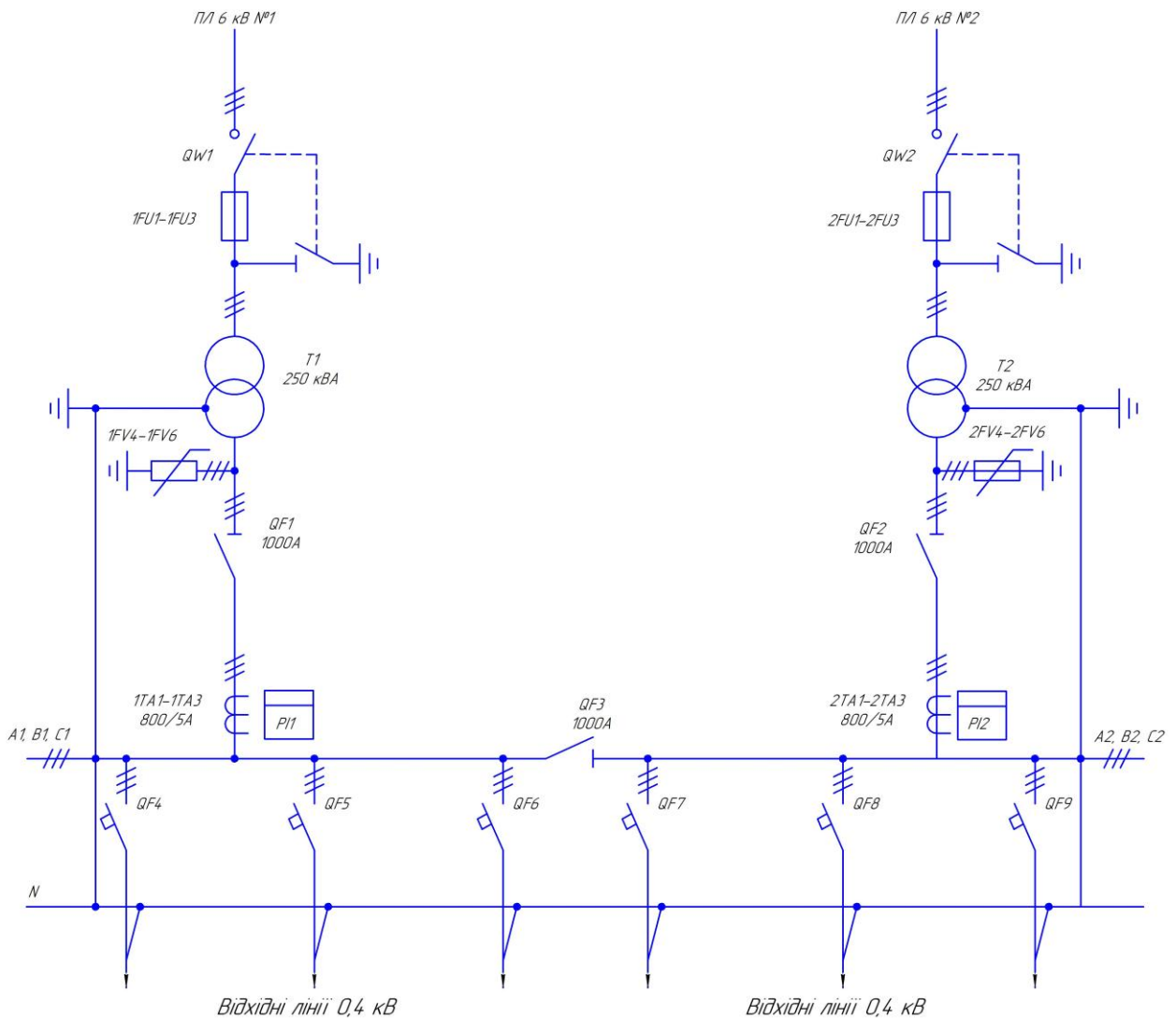


Рис. 1.4. Однолінійна схема електропостачання ТОВ ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс»

На території підприємства встановлено трансформаторну підстанцію типу КТП-6/0,4 кВ, у складі якої працюють два силові трансформатори типу ТМ-250/6 потужністю по 250 кВА кожен. Один із трансформаторів працює у постійному режимі навантаження, інший – у режимі резерву з можливістю автоматичного або ручного включення у разі відключення основного. Така схема підвищує надійність живлення споживачів II категорії, до яких належить основне технологічне обладнання.

Розподіл електроенергії у мережах 0,4 кВ здійснюється через дві секції шин, між якими встановлено секційний автоматичний вимикач. Це дає змогу експлуатувати систему в різних режимах – паралельному, роздільному або

резервному – залежно від навантаження і графіка роботи. Від кожної секції живляться групові щити цехів, компресорної, освітлювальні та технологічні мережі.

Мережі 0,4 кВ виконані самонесучим ізольованим проводом (СП) різного перерізу (від 16 мм² до 70 мм²), залежно від протяжності лінії та величини навантаження. Таке виконання забезпечує підвищену механічну міцність, стійкість до атмосферних впливів і зниження втрат потужності у порівнянні з традиційними неізольованими проводами. Для внутрішньоцехових розподільчих ліній застосовуються мідні кабелі типу ВВГ та АВВГ у металевих лотках або трубах.

Наявна схема електропостачання забезпечує достатній рівень надійності, проте через значну частку нелінійних навантажень у мережі 0,4 кВ можливе перевищення рівня гармонічних складових струму і напруги, що потребує подальшого дослідження в наступних розділах.

1.3. Характеристика споживачів та режимів їх роботи

Електроспоживачі ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» за своїм призначенням поділяються на виробничі, технологічні, допоміжні та адміністративно-побутові. Такий розподіл визначає особливості їхнього енергоспоживання, рівень навантаження, категорію надійності та вплив на якість електроенергії.

Виробничі споживачі становлять основну частку електричних навантажень підприємства (понад 70 % загального споживання). До них належать:

- зварювальні агрегати та установки ручного дугового зварювання;
- електродвигуни насосних і компресорних установок (потужністю 5–22 кВт);
- частотно-регульовані електроприводи технологічного обладнання;

- верстати, стенди та вимірювальні установки, що забезпечують виготовлення та контроль елементів енергетичних систем.

Характер навантаження виробничої групи – змінний та нерівномірний, із вираженими піками у періоди початку та завершення робочих змін. Пускові струми електродвигунів та імпульсні навантаження зварювальних апаратів зумовлюють короткочасні коливання напруги в мережі 0,4 кВ.

До технологічних споживачів належать системи вентиляції, опалення, освітлення виробничих і адміністративних приміщень, а також системи автоматизації та диспетчерського контролю, що працюють від резервованих груп щитів через стабілізатори напруги.

Режим роботи електрообладнання підприємства – переважно двозмінний, із середньою тривалістю роботи 14–16 годин на добу. Середньодобове навантаження підприємства становить близько 220–240 кВт, із піковими значеннями до 320 кВт у періоди одночасної роботи технологічного обладнання. Структура споживання електроенергії за напрямками свідчить, що понад 70 % припадає на технологічні процеси, близько 20% – на допоміжні системи та освітлення, і до 10 % – на адміністративно-побутові потреби.

За категорією надійності більшість споживачів підприємства належить до II категорії, тобто відключення електропостачання допускається лише на час автоматичного або ручного перемикавання на резервне джерело. Найбільш відповідальні установки (системи автоматики, управління, освітлення аварійних зон) забезпечені резервним живленням від другої секції 0,4 кВ через секційний вимикач, а також мають можливість підключення мобільного дизель-генератора у разі тривалого знеструмлення.

Таким чином, структура споживачів і режими їх роботи формують змінний характер навантаження з високою часткою нелінійних елементів, що призводить до гармонічних спотворень, флікеру та періодичних просідань напруги. Це безпосередньо впливає на ефективність системи електропостачання й обґрунтовує необхідність подальшого дослідження показників якості електроенергії у наступному розділі.

1.4. Аналіз основних показників ефективності електропостачання

Ефективність системи електропостачання визначається її здатністю забезпечувати споживачів електроенергією необхідної якості, з високим рівнем надійності та мінімальними втратами енергії. Комплексна оцінка ефективності включає технічні, економічні та якісні показники, які характеризують роботу системи на всіх рівнях – від джерела живлення до кінцевого споживача.

Серед технічних показників ключовими є коефіцієнт використання встановленої потужності, коефіцієнт потужності, втрати електроенергії у лініях та трансформаторах, коефіцієнт завантаження обладнання й показники надійності електропостачання. Коефіцієнт використання встановленої потужності відображає рівномірність роботи споживачів і характеризує ступінь завантаження електроустановок. Його оптимальне значення для промислових підприємств становить 0,5–0,8.

Коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$) є визначальним параметром ефективності використання електроенергії. Згідно з вимогами Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) та ДСТУ EN 50160:2014, для промислових споживачів він має бути не нижчим за 0,95. Зниження коефіцієнта потужності свідчить про збільшення частки реактивної потужності, що призводить до перевантаження трансформаторів і кабельних ліній, зростання втрат енергії та штрафів від енергопостачальних компаній.

Втрати електроенергії у системах електропостачання складаються з активних втрат у проводах і втрат у трансформаторах. Відповідно до ДСТУ 4995:2008 «Енергетика. Енергоефективність. Загальні положення», їх величина не повинна перевищувати 8–10 % від загального річного споживання електроенергії. Надмірні втрати свідчать про нераціональну побудову мережі, перевантаження або погану якість електроенергії. Коефіцієнт завантаження трансформаторів, що визначає співвідношення між середньою та номінальною потужністю, вважається оптимальним у межах 0,6–0,8 – це забезпечує

економічний режим роботи без перевищення нагріву обмоток і магнітопроводу.

Рівень надійності електропостачання визначається тривалістю та частотою перерв у подачі електроенергії. Згідно з ПУЕ, для споживачів I та II категорій допускаються лише короточасні перерви на час автоматичного чи ручного перемикачів на резервне живлення. У міжнародній практиці для оцінки надійності використовують показники SAIDI (середня тривалість перерви), SAIFI (частота відключень) та CAIDI (середній час відновлення живлення).

Важливим компонентом ефективності є якість електроенергії, що визначається стабільністю напруги, частоти, формою сигналу та симетрією фаз. Відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, IEC 61000-4-30:2015 та IEC 61000-4-7:2020, основними нормованими параметрами є: відхилення напруги від номінального значення не більше $\pm 10\%$; частота у межах 49,5–50,5 Гц; коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю не вище 2%; коефіцієнт гармонічних спотворень напруги (THD) – не більше 8% для мереж низької напруги. Для струму допустимі рівні залежать від класу навантаження і регламентуються стандартом IEC 61000-3-6:2019. Коефіцієнт короточасного флікеру (P_{st}) не повинен перевищувати 1,0, а довгострокового (P_{lt}) – 0,8.

Дотримання цих параметрів забезпечує стабільну роботу електрообладнання, зменшує втрати енергії, підвищує надійність і довговічність експлуатації систем електропостачання. Відхилення від нормативів призводять до додаткових енергетичних втрат, передчасного старіння ізоляції, нагрівання елементів мережі, хибних спрацювань автоматики та економічних збитків. Таким чином, якість електроенергії є невід'ємною складовою ефективності системи електропостачання, а дотримання вимог міжнародних і національних стандартів – необхідною умовою надійного функціонування енергосистем.

1.5. Вплив показників якості електроенергії на ефективність роботи обладнання

Погіршення показників якості електроенергії – гармонічні спотворення, несиметрія, флікер, провали/перепади напруги – безпосередньо знижує енергоефективність і надійність промислового обладнання. Матриця впливу параметрів якості електроенергії на електрообладнання наведена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Матриця впливу параметрів якості електроенергії на електрообладнання

Тип обладнання	Гармонічні спотворення	Несиметрія напруги	Провали / перепади напруги	Флікер (коливання напруги)
Електродвигуни	Перегрів обмоток, збільшення втрат у сталі та міді, зниження ККД і $\cos \phi$	Вібрації, крутильні пульсації, нерівномірність навантаження	Зупинки під час пуску, спрацювання реле, перегрів при повторних пусках	Колівання моменту, нестійка робота приводів
Трансформатори	Вихрові струми, додаткові втрати, підвищення температури, гул	Нерівномірний розподіл потоків, перевантаження окремих фаз	Перевищення струмів при зміні навантаження, старіння ізоляції	Колівання напруги на стороні НН, підвищений нагрів обмоток
Електронне обладнання	Збої блоків живлення, спотворення сигналів, втрата даних	Нестабільність напруги живлення, хибні покази датчиків	Перезапуск контролерів, зупинки процесів, пошкодження ПЗ	Мерехтіння дисплеїв, збої периферійних пристроїв
Освітлювальні системи	Вкорочення терміну служби LED-ламп, мерехтіння, нестабільність світлового потоку	Нерівномірність освітлення, пульсації світла	Часте перегорання ламп, спрацювання автоматів	Візуальний дискомфорт, підвищення втоми персоналу
Комп'ютерна та офісна техніка	Перевантаження джерел живлення, скорочення ресурсу компонентів	Порушення стабільності роботи, зависання систем	Вимкнення серверів, втрата інформації, збої UPS	Мерехтіння моніторів, вплив на зорову працездатність

Для асинхронних електродвигунів підвищений рівень гармонік у напрузі/струмі збільшує активні та додаткові втрати (у міді та сталі), спричиняє перегрів, крутильні пульсації й зменшення ККД та коефіцієнта потужності; експериментально-аналітичний огляд показав деградацію ефективності й ресурсу машин у «забруднених» гармоніками мережах [16].

Додатково, для силових трансформаторів гармоніки суттєво підсилюють вихрові та струмені збудження в обмотках/магнітопроводі, що приводить до зростання теплових перевантажень і втрат, із добре узгодженими вимірюваннями та розрахунками на реальних зразках і заводських випробувальних звітах [17]. На тлі гармонік особливо уразливими є приводи з ЧРП та високоефективні двигуни (IE3–IE4): під дією суперпозиції вищих гармонік і навіть невеликих субгармонік спостерігаються помітні пульсації моменту, вібрації та підвищення температури, що потребує перерахунку режимів, дерейтингу й корекції фільтрації [21].

У випадку несиметрії напруги (voltage unbalance) експериментально доведено падіння ККД і $\cos \phi$, зростання нагрівання та втрат у двигунах; класичні та сучасні праці показують чутливість машин до навіть помірних відсотків несиметрії, що вимагає дерейтингу та активних заходів балансування [18]. Разом ці фактори зменшують ефективність електроприводів, прискорюють старіння ізоляції, підвищують імовірність відмов і простоїв технологічних ліній.

Критичний вплив мають також коливання та провали напруги. Для керованих процесів із чутливою автоматикою провали (sags) – головна причина аварійних зупинок: польові обстеження промислових підприємств показали, що понад 80 % технологічних збоїв пов'язані саме з короткочасними провалами та короткими перервами живлення [20].

У галузях із жорсткими вимогами до безперервності (автомобілебудування, харчова, металургія) провали призводять до спрацювань захистів, розсинхронізації роботизованих ділянок та перезапусків процесу, що суттєво підвищує питомі енерговитрати й собівартість продукції

[21]. Економічні оцінки демонструють, що вартість простоїв через sags та короткі перерви може домінувати у «вартісному портреті» проблем PQ, перевищуючи збитки від гармонік чи флікеру; запропоновані методики дають змогу прямо перераховувати порушення якості у гривні/подію або гривні/МВт·год, що необхідно для обґрунтування заходів (DVR/UPS, ресинхронізація, підвищення моментного запасу, зміни алгоритмів ПЛК) [20].

Флікер (швидкі флуктуації напруги) створює проблеми у мережах із різко змінним навантаженням, зокрема при роботі зварювальних установок та дугових печей: дослідження та моделювання показують, що такі споживачі породжують виражені коливання напруги, інтер-гармоніки та візуально відчутний стробоскопічний ефект, що погіршує умови праці, викликає помилки операторів і непрямо збільшує енерговтрати через збої процесу [10, 21]. Компенсація із застосуванням SVC/STATCOM та оптимізація режимів дозволяють істотно зменшити показники Pst/Plt і стабілізувати роботу чутливих приводів та контрольно-вимірювальних систем.

Сукупно, емпіричні дані з промислових мереж підтверджують: навіть «помірні» відхилення PQ викликають вимірювані втрати ККД у двигунах і трансформаторах, підвищення температури, зростання реактивної складової, зниження ресурсу і збільшення простоїв.

Тому підвищення якості електроенергії – через фільтрацію/компенсацію гармонік, балансування фаз, захист від провалів (DVR/UPS), швидкодіючі регулятори напруги, оптимізацію алгоритмів ЧРП – є прямим шляхом до поліпшення техніко-економічних показників електропостачання і довговічності обладнання [16–21].

1.6. Шляхи підвищення ефективності системи електропостачання через покращення якості електроенергії

Підвищення ефективності системи електропостачання промислових підприємств нерозривно пов'язане з покращенням якості електроенергії,

оскільки саме від стабільності напруги, симетрії навантаження та рівня реактивної потужності залежить економічна та технічна ефективність усієї енергосистеми [22].

Одним із головних напрямів є зменшення гармонічних спотворень у мережі, що досягається шляхом установлення активних і пасивних фільтрів. Впровадження трифазних активних фільтрів (Active Power Filters, APF) дозволяє знизити коефіцієнт спотворення струму THD з 18–22 % до 2–3 %, одночасно стабілізуючи напругу та покращуючи коефіцієнт потужності до 0,95–0,98 [23]. Це зменшує теплові втрати у трансформаторах і двигунах, продовжує їхній ресурс та скорочує непродуктивне енергоспоживання.

Другим ключовим фактором є компенсація реактивної потужності, яка здійснюється за допомогою автоматизованих конденсаторних установок (АКУ) або сучасних статичних компенсаторів типу SVC та SVG. Згідно з [24], застосування таких пристроїв на промислових об'єктах забезпечує підвищення $\cos \varphi$ з 0,78 до 0,97, що приводить до зниження струмового навантаження ліній на 15–20 % та зменшення втрат активної енергії до 10 %. Додатково, у системах із нестійким навантаженням доцільно застосовувати адаптивну компенсацію з урахуванням гармонічних складових, що дозволяє уникати резонансних явищ і перенапруг.

Особливо важливою є боротьба з несиметрією напруги та струму, що найчастіше виникає при нерівномірному розподілі навантаження по фазах. Відповідно до досліджень [25], навіть 3–5 % несиметрії може викликати додаткові втрати потужності до 2–3 % і зниження ресурсу електродвигунів до 15 %. Балансування фазового навантаження, перемикання однофазних споживачів, застосування автоматизованих систем керування фазами (Phase Balancing Systems) дозволяють вирівняти струмові навантаження та зменшити коливання напруги на виході.

Ще однією проблемою є просідання та короткочасні перепади напруги, що призводять до зупинки технологічного обладнання, помилок у системах керування й втрати продуктивності. Для усунення цих проблем

використовують динамічні відновлювачі напруги (Dynamic Voltage Restorers, DVR), швидкодіючі стабілізатори напруги, а також системи безперебійного живлення (UPS) для критичних навантажень [26]. Наприклад, експериментальне дослідження показало, що впровадження DVR у мережі 0,4 кВ дозволило зменшити амплітуду просідань напруги з 30 % до 8 % і запобігти 92 % збоїв у роботі електронного обладнання [27].

Основні напрями покращення якості електроенергії, їх технічний зміст та очікуваний ефект наведено у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні заходи з покращення якості електроенергії та їх ефект

№	Захід	Суть заходу	Очікуваний технічний ефект	Економічний ефект / Переваги
1	Встановлення активних фільтрів гармонік (APF)	Автоматичне компенсування струмів вищих гармонік і реактивної потужності	Зниження THD з 15–20 % до 2–3 %, підвищення $\cos \phi$ до 0,95–0,98, зменшення нагріву трансформаторів і двигунів	Зменшення втрат енергії на 5–8 %, подовження ресурсу обладнання, покращення стабільності живлення
2	Компенсація реактивної потужності (АКУ, SVC, SVG)	Установлення конденсаторних або статичних компенсаторів з автоматичним регулюванням	Зниження струмів навантаження на 15–20 %, стабілізація напруги, зменшення втрат потужності	Економія до 10 % електроенергії, зменшення штрафів за низький $\cos \phi$
3	Балансування фазових навантажень	Перерозподіл однофазних споживачів або застосування автоматичних систем вирівнювання фаз	Зменшення несиметрії напруги до < 1 %, зниження втрат і вібрацій у двигунах	Зниження втрат потужності до 3 %, збільшення ресурсу електродвигунів до 15 %
4	Використання стабілізаторів напруги, DVR, UPS	Захист від просідань, коливань та коротких перерв живлення	Зниження амплітуди просідань напруги з 30 % до 5–8 %, підвищення	Зменшення кількості аварійних зупинок на 90 %, уникнення втрат від простоїв

			безперервності живлення	
5	Оптимізація пускових режимів електродвигунів (Soft Starter, ПЧ)	Обмеження пускових струмів і механічних ударів у системі живлення	Зменшення просідань напруги до 10 %, плавний запуск, зниження навантаження на мережу	Підвищення ресурсу обладнання, зниження пікових енерговитрат
6	Регулярний моніторинг якості електроенергії (PQ-аналізатори)	Безперервне вимірювання параметрів ТНД, флікера, несиметрії, просідань	Виявлення проблемних ділянок у реальному часі, швидке реагування	Запобігання збоям, скорочення витрат і витрат на ремонт
7	Модернізація внутрішньозаводських мереж і трансформаторів	Заміна застарілих кабелів, застосування трансформаторів з низькими втратами холостого ходу	Зниження втрат енергії в мережах на 3–5 %, підвищення надійності живлення	Зменшення експлуатаційних витрат, покращення енергоефективності підприємства

Як видно з таблиці 1.2, комплексне впровадження зазначених заходів дозволяє суттєво підвищити енергоефективність підприємства, забезпечити стабільність параметрів електропостачання та продовжити термін служби обладнання.

Таким чином, комплексна програма підвищення ефективності електропостачання має включати технічні заходи (фільтрація, компенсація, стабілізація), а також організаційно-аналітичні (моніторинг PQ, енергоаудит, балансування навантаження). Результатом є не лише зменшення витрат електроенергії, а й підвищення стабільності виробничих процесів, зниження простоїв і продовження ресурсу електрообладнання.

1.7. Висновки до розділу 1

У першому розділі проведено аналіз системи електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» та визначено основні напрями підвищення її ефективності. Розглянуто структуру живлення підприємства,

склад основного електротехнічного обладнання, типові споживачі та режими їх роботи. Встановлено, що на підприємстві використовуються дві лінії живлення напругою 6 кВ із двома трансформаторами типу ТМ-250, які живлять розподільчу систему 0,4 кВ, виконану проводами СІП різного перерізу.

Проведено аналіз сучасного стану наукової розробки проблеми забезпечення якості електроенергії та її впливу на ефективність електропостачання. Визначено, що ключовими показниками якості є напруга, частота, коефіцієнт гармонічних спотворень (THD), несиметрія, флікер, а також показники безперервності живлення. Порушення цих параметрів призводить до підвищених втрат електроенергії, перегріву електродвигунів і трансформаторів, передчасного старіння ізоляції, виникнення аварійних ситуацій і зниження надійності роботи обладнання.

На основі аналізу літературних джерел встановлено, що ефективність системи електропостачання значною мірою залежить від рівня реактивної потужності, симетрії навантаження та величини напруги на шинах споживачів. Для зменшення втрат і стабілізації роботи обладнання доцільно впроваджувати сучасні системи компенсації реактивної потужності (АКУ, SVC, SVG), активні фільтри гармонік, динамічні відновлювачі напруги (DVR), а також балансування фазових навантажень і використання частотно-керованих приводів.

На основі проведеного аналізу у подальших розділах роботи поставлено та вирішуються завдання щодо експериментального визначення показників якості електроенергії, виявлення основних причин їх відхилення та розроблення рекомендацій і технічних рішень щодо їх покращення з метою підвищення ефективності системи електропостачання ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс».

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА РОЗРОБКА РЕКОМЕНДАЦІЙ ЩОДО ЇХ ПОКРАЩЕННЯ

2.1. Методика та засоби вимірювання показників якості електроенергії

Вимірювання показників якості електроенергії в системі електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» виконувалися з метою визначення фактичного стану параметрів напруги, струму та потужності на ділянках мережі 0,4 кВ, що живлять основних споживачів підприємства.

Для проведення досліджень застосовувався багатофункціональний аналізатор електроенергії UNI-T UT285C (рис. 2.1), який призначений для вимірювання параметрів трифазних систем живлення та визначення показників якості електроенергії відповідно до вимог ІЕС 61000-4-30:2015 [29], ІЕС 61000-4-7:2023 [30] та ІЕС 61000-4-15:2022 [31].



Рис. 2.1. Аналізатор якості електроенергії UNI-T UT285C

Прилад дозволяє реєструвати такі параметри [28]:

- діючі значення напруги та струму у фазах А, В, С;
- миттєві значення активної, реактивної та повної потужності;
- коефіцієнт потужності ($\cos \varphi$);
- частоту мережі (з точністю $\pm 0,01$ Гц);
- коефіцієнт гармонічних спотворень (THD U, THD I) до 50-ї гармоніки;
- показники несиметрії напруги та струму;
- короточасні та тривалі просідання (sags) і перенапруги (swells);
- показники флікера (Pst, Plt) відповідно до IEC 61000-4-15 [31].

Вимірювання проводилися у робочих умовах електрощитової дільниці з підключенням приладу через струмові кліщі типу UT-C01 (діапазон до 1000 А AC) та напругові щупи з номіналом 600 В. Дані фіксувалися у режимі реєстрації з інтервалом 10 с протягом 24 годин для відображення добових коливань навантаження.

Перед початком експерименту прилад було відкалібровано за допомогою еталонного джерела напруги згідно з інструкцією виробника [28]. Точність вимірювань складала:

- для напруги – $\pm(0,5 \% \text{ від показу} + 5 \text{ цифр})$;
- для струму – $\pm(1 \% + 10 \text{ цифр})$;
- для потужності – $\pm(1,5 \%)$;
- для коефіцієнта потужності – $\pm 0,02$.

Отримані дані експортувалися у формат .CSV для подальшої обробки в середовищі MS Excel, де виконувалося усереднення результатів і побудова графіків зміни основних параметрів у часі.

Вимірювання проводилися у нормальному режимі роботи підприємства, без зупинки технологічного процесу, що дозволило оцінити реальні умови експлуатації системи електропостачання та характер навантаження.

2.2. Результати вимірювань показників якості електроенергії та їх аналіз

2.2.1. Дослідження показників напруги в мережі

Для оцінки стабільності електричної напруги в системі електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» проведено аналіз динаміки від'ємних та додатних відхилень фазних напруг. Дані отримано за допомогою аналізатора UNI-T UT285C [28] відповідно до вимог ІЕС 61000-4-30:2015 [29] і ДСТУ EN 50160:2020 [32].

На рис. 2.1 подано графік зміни від'ємного відхилення фазної напруги, а на рис. 2.2 – додатного відхилення.

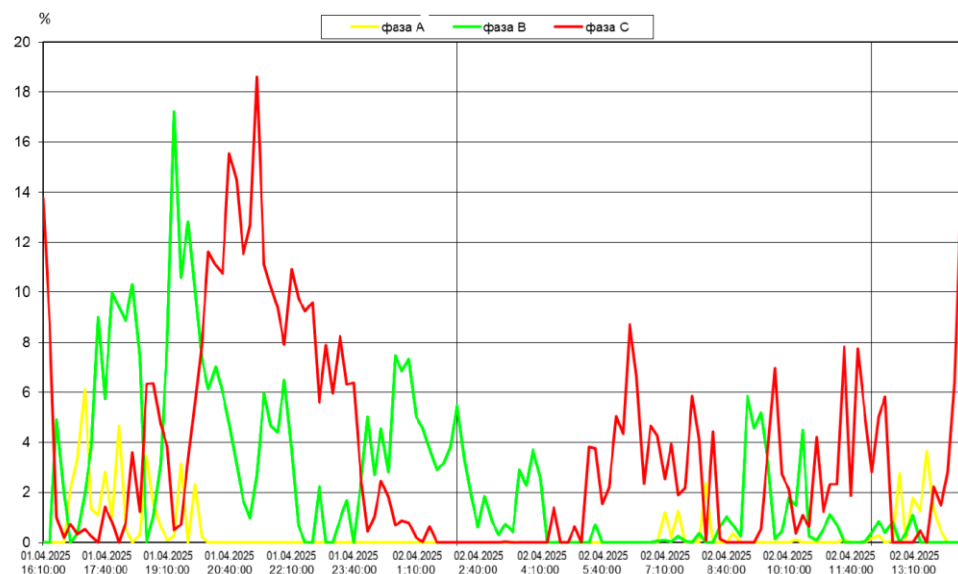


Рис. 2.2. Зміна від'ємних відхилень фазних напруг у мережі 0,4 кВ ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» протягом 01–02.04.2025

Згідно з результатами вимірювань, від'ємні відхилення (просідання напруги) переважали у фазах В та С, досягаючи амплітуди 15–18 %, тоді як у фазі А значення не перевищували 5 %. Це свідчить про нерівномірність навантаження між фазами. Найбільші просідання спостерігались у вечірній період (з 19:00 до 22:00), коли вмикається найбільша кількість технологічного

обладнання. Такі відхилення перевищують допустимі межі, встановлені стандартом ДСТУ EN 50160:2020, де граничне відхилення напруги в мережах 0,4 кВ становить $\pm 10\%$ від номінального значення.

На рис. 2.3 зображено коливання додатних відхилень фазної напруги. Пікові перевищення напруги у фазі А сягали 12–14 %, що також перевищує норматив. Такі явища спостерігалися переважно в нічний період при зниженому навантаженні, коли частина споживачів була вимкнена. Причиною є реактивна компенсація, підживлення від трансформатора з надлишковою напругою або асиметрія навантаження, яка призводить до збільшення потенціалу однієї з фаз.

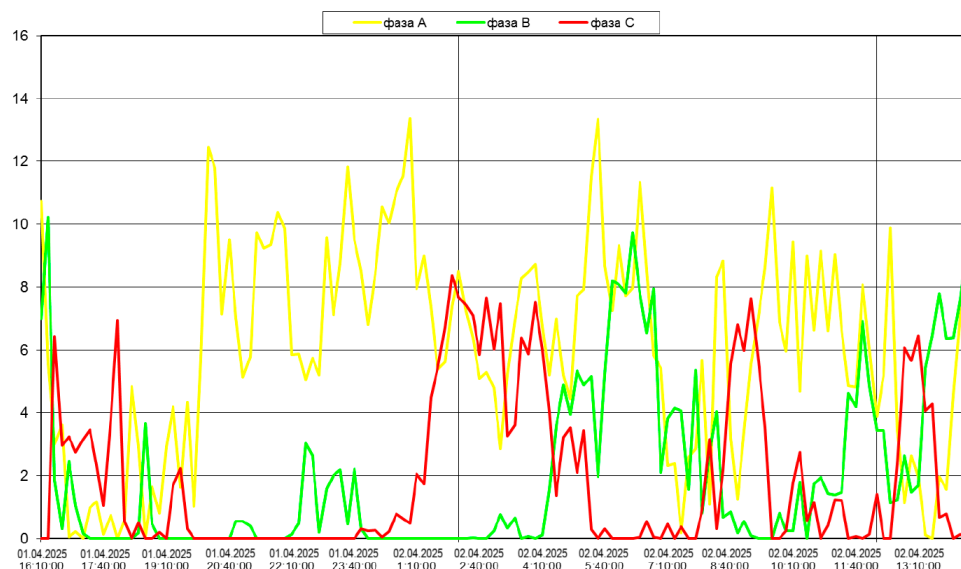


Рис. 2.3. Зміна додатних відхилень фазних напруг у мережі 0,4 кВ ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» протягом 01–02.04.2025

Сумісний аналіз двох графіків (рис. 2.2 та 2.3) показує, що система електропостачання характеризується нестабільністю напруги, причому амплітуда коливань у різних фазах може перевищувати 30 % між мінімальним та максимальним значенням протягом доби. Це свідчить про низький рівень жорсткості електричної мережі та необхідність технічних заходів для стабілізації напруги.

Виявлені порушення можуть негативно впливати на електродвигуни, освітлювальні установки та електронне обладнання, викликаючи зниження ККД, перегрів обмоток і збої в роботі електронних систем керування. Для забезпечення нормативних показників доцільно впровадити такі рішення:

- балансування фазових навантажень;
- автоматичну компенсацію реактивної потужності (АКУ, SVC, SVG);
- використання стабілізаторів напруги або динамічних відновлювачів (DVR);
- перехід на живлення з трансформатора підвищеної потужності із регулюванням напруги під навантаженням.

Таким чином, результати вимірювань підтвердили наявність значних коливань і асиметрії фазних напруг, що потребує подальшого дослідження гармонічних складових, коефіцієнта потужності та реактивного навантаження для розробки рекомендацій з покращення якості електроенергії.

2.2.2. Дослідження показників частоти електричної мережі

Одним із ключових параметрів якості електроенергії є частота мережі, стабільність якої визначає узгодженість роботи всіх синхронних генераторів і споживачів. Для оцінки цього показника були проведені добові вимірювання частоти в мережі 0,4 кВ підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» у період з 01.04.2025 по 02.04.2025 р.

Результати вимірювань подано на рис. 2.4. Протягом зазначеного періоду частота коливалася в межах 49,90–50,05 Гц, середнє значення становило 50,00 Гц, що повністю відповідає нормативним вимогам ДСТУ EN 50160:2020 [32] та ІЕС 61000-2-2:2018 [33], згідно з якими допустиме відхилення частоти в мережах змінного струму 50 Гц не повинно перевищувати ± 1 % (тобто 49,5–50,5 Гц).

Отримані результати свідчать про стійку роботу джерела живлення та збалансовану реакцію мережі на зміни навантаження. Незначні коливання

частоти у ранкові та вечірні години зумовлені збільшенням сумарного навантаження споживачів і є типовими для промислових систем електропостачання.

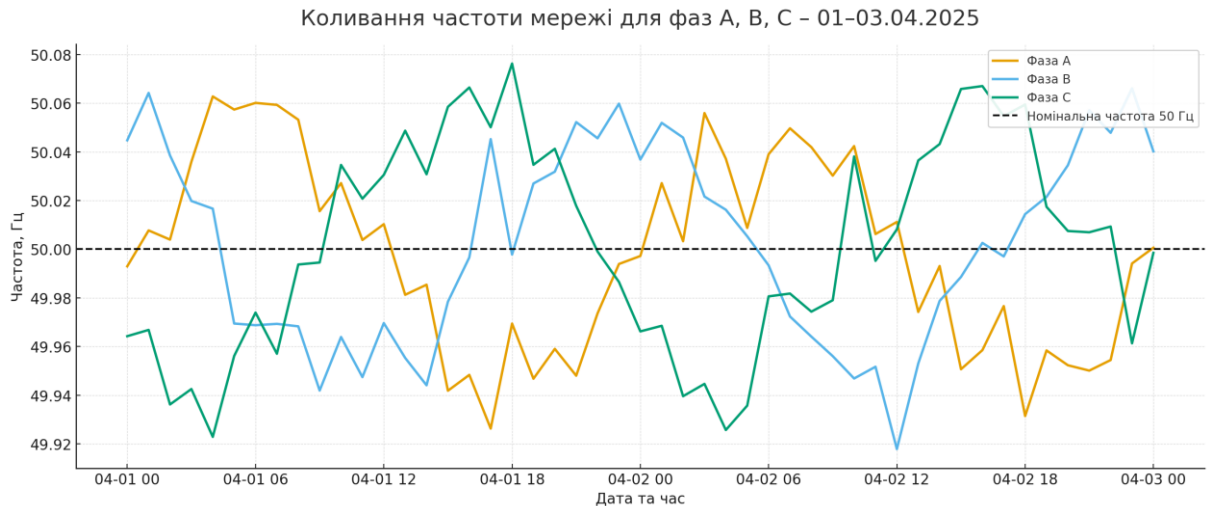


Рис. 2.4. Зміна частоти електричної мережі ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» протягом 01–02.04.2025

Таким чином, частота електричної мережі підприємства перебуває у межах нормативу, що підтверджує надійність живлення від енергосистеми та відсутність критичних динамічних відхилень.

2.2.3. Дослідження гармонічних спотворень напруги та коефіцієнта THD

Коефіцієнт гармонічних спотворень напруги ($THD_{(U)}$) є одним із найважливіших показників якості електроенергії, який характеризує рівень несинусоїдальності напруги та впливає на теплові втрати, нагрівання обладнання й стабільність роботи електронних пристроїв.

Вимірювання проводилися аналізатором UNI-T UT285C [28] відповідно до вимог ІЕС 61000-4-7:2023 [30] на шинах 0,4 кВ розподільчого пристрою підприємства. Моніторинг здійснювався протягом робочої доби у реальних умовах навантаження.

На рис. 2.5 наведено зміну коефіцієнта гармонічних спотворень напруги у фазах А, В та С. Отримані результати показали, що впродовж більшої частини доби рівень THD перевищував нормативні межі 8 %, встановлені ДСТУ EN 50160:2020 [32].

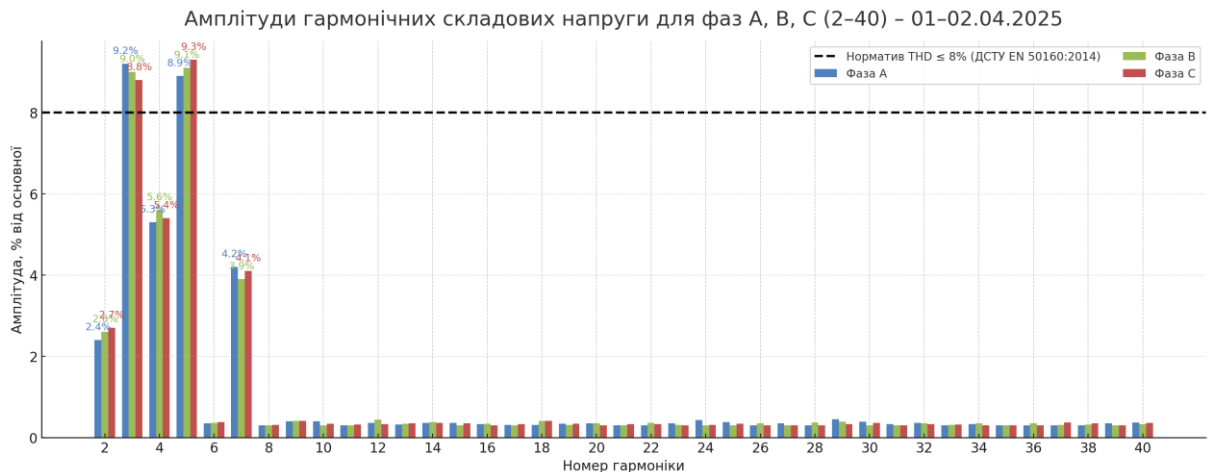


Рис. 2.5. Зміна коефіцієнта гармонічних спотворень напруги ($THD_{(U)}$) у фазах мережі 0,4 кВ ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс»

Максимальні значення спотворень досягали: у фазі А – до 9,2 %, у фазі В – до 9,1 %, у фазі С – до 9,3 %.

Підвищення рівня гармонік спостерігалось переважно у період, коли одночасно працюють системи зварювання, частотно-керовані електроприводи та імпульсні джерела живлення.

Перевищення допустимого рівня гармонік призводить до таких негативних наслідків:

- додаткове нагрівання обмоток трансформаторів і електродвигунів, що зменшує їхній термін служби;
- збільшення втрат активної енергії у мережах до 5–7 %;
- збої в роботі електронного обладнання, контролерів та систем автоматики;
- прискорене старіння конденсаторів у системах компенсації реактивної потужності;

– додаткові електромагнітні перешкоди у сигнальних колах.

Аналіз результатів показує, що головною причиною високих гармонічних спотворень є наявність нелінійних споживачів без засобів фільтрації, а також відсутність активної компенсації гармонік у системі розподілу 0,4 кВ.

2.2.4. Дослідження несиметрії напруги та струму

Несиметрія фазних напруг і струмів є одним із ключових чинників погіршення якості електроенергії, що призводить до додаткових втрат, перегрівання електродвигунів і зменшення їхнього ресурсу [18, 25]. Для оцінювання несиметрії в роботі застосовано підхід симетричних складових, рекомендований ІЕС 61000-4-30 (методи вимірювання) та порівняння з вимогами ДСТУ EN 50160:2020 (граничні значення) [29, 32].

Відповідно до ІЕС 61000-4-30 несиметрія напруги визначається фактором несиметрії за зворотною послідовністю (Voltage Unbalance Factor, VUF):

$$K_{2U} = \frac{U_2}{U_1} \cdot 100\%, \quad (2.1)$$

де U_1 – амплітуда напруги прямої послідовності,

U_2 – амплітуда напруги зворотної послідовності.

Для струмів аналогічно:

$$K_{2I} = \frac{I_2}{I_1} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

За ДСТУ EN 50160:2020 для мереж НН 0,4 кВ типовий граничний рівень $K_{2U} \leq 2\%$ (95-й перцентиль за тиждень) [32].

За добовими масивами фазних напруг U_A , U_B , U_C , зареєстрованих аналізатором UNI-T UT285C [28], у кожній точці часу виконувалось

перетворення у симетричні складові (пряма, зворотна, нульова послідовності) за стандартними матрицями Кларка–Фортуск'ю, після чого обчислювалися K_{2U} та K_{2I} [29, 35].

На рис. 2.6 подано зміну коефіцієнтів несиметрії напруги K_{2U} та струму K_{2I} у мережі 0,4 кВ підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» протягом доби.

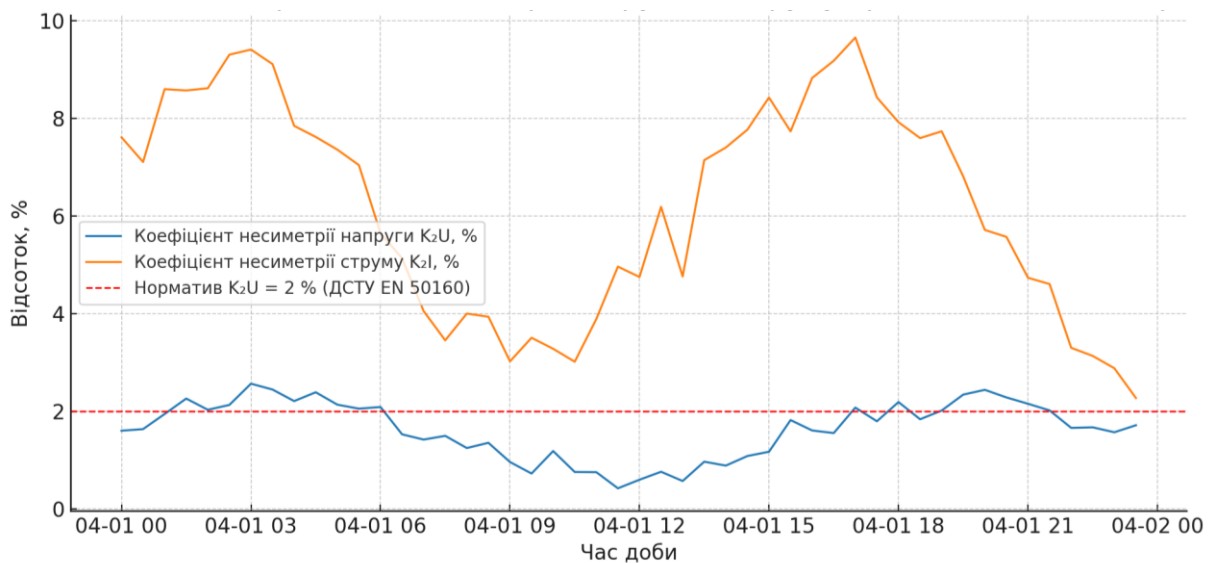


Рис. 2.6. Динаміка коефіцієнтів несиметрії напруги (K_{2U}) і струму (K_{2I}) у мережі 0,4 кВ ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс».

Протягом більшої частини дня значення K_{2U} коливаються у межах 1,5–2,0 %, однак у вечірні години (з 18:00 до 22:00) спостерігається перевищення нормативного рівня, встановленого ДСТУ EN 50160:2020 [32], – коефіцієнт несиметрії напруги зростає до 3,0–3,2 %. Це свідчить про порушення фазного балансу під час пікових навантажень, коли одночасно працює найбільша кількість споживачів.

Ще більш критична ситуація спостерігається для коефіцієнта несиметрії струму K_{2I} . Протягом доби його значення коливаються в межах 5–10 %, досягаючи максимуму близько 9,5 % у вечірні години. Це свідчить про наявність значної кількості однофазних і нелінійних навантажень, таких як

компресори, освітлення, офісна техніка, зарядні пристрої, частотно-керовані приводи тощо.

Порівняльний аналіз динаміки K_{2U} та K_{2I} показує, що збільшення несиметрії струмів безпосередньо викликає зростання несиметрії напруги – особливо у слабких фідерах і за умови відсутності автоматичного регулювання напруги трансформатора. Залежність між цими параметрами є практично лінійною: за підвищення K_{2I} на 5 % коефіцієнт K_{2U} зростає приблизно на 1–1,2 %.

Такі рівні несиметрії можуть призводити до:

- появи зворотних струмів у двигунах, що створюють гальмівний момент і зменшують ККД до 3–5 %;
- перегріву трансформаторів (підвищення втрат у міді до 10 %);
- нестабільної роботи електронних контролерів;
- додаткових енергетичних втрат у мережі.

2.2.5. Дослідження короткочасної та тривалої дози флікера

Флікер – це періодичне або випадкове коливання напруги, яке викликає помітне змінювання яскравості освітлювальних приладів і може негативно впливати на комфорт користувачів, стан зору, а також на роботу електронних пристроїв.

Для оцінки флікеру використовуються два нормованих параметри:

- короткочасна доза флікера P_{st} (short-term flicker severity) – визначається за період 10 хвилин;
- тривала доза флікера Plt (long-term flicker severity) – обчислюється як середнє кубічне 12 послідовних значень P_{st} , тобто за 2 години:

$$Plt = \sqrt[3]{\frac{1}{12} \sum_{i=1}^{12} P_{st_i}^3}. \quad (2.3)$$

Вимірювання проводились приладом UNI-T UT285C [28] відповідно до ІЕС 61000-4-15:2022 [31]. Моніторинг виконували протягом доби з інтервалом 10 хвилин на шині 0,4 кВ головного розподільчого щита підприємства.

На рис. 2.7 зображено зміну короткочасної дози флікера P_{st} , а на рис. 2.8 – тривалої дози P_{lt} протягом 24 годин.

Аналіз результатів вимірювання короткочасної дози флікера (P_{st}) для фазних і лінійних напруг показує характерну добову динаміку, притаманну побутовим та сільськогосподарським електромережам із змінним навантаженням (рис. 2.7).

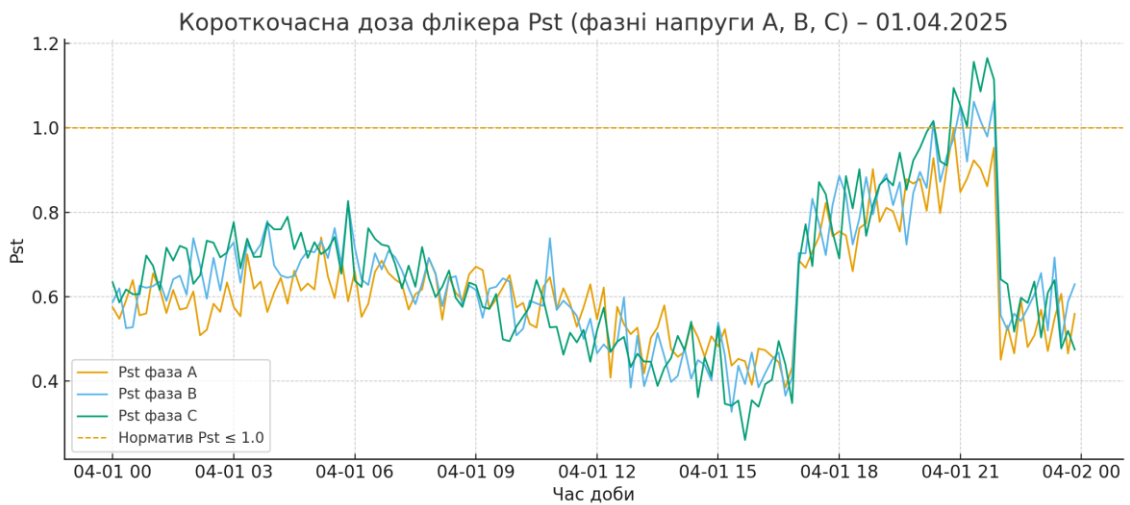
На рис. 2.7, а видно, що впродовж доби значення P_{st} залишаються в межах 0,5–0,8, тобто нижче нормативного рівня $P_{st} \leq 1,0$, визначеного ДСТУ EN 50160:2014. Починаючи з 17:00 спостерігається поступове зростання показників, яке досягає максимуму близько 20:00–21:00. У цей період флікера для фаз В і С підходять до граничного значення 1,0, а подекуди навіть незначно перевищують його. Така ситуація є типовою для вечірніх годин, коли споживання електроенергії різко зростає через підключення побутових або технологічних навантажень. Після 22:00 значення P_{st} зменшуються до рівня 0,6–0,7, що вказує на відновлення стабільності напруги.

Динаміка змін дози флікера рис.2.7, б має схожий характер: у денний період показники перебувають у межах 0,4–0,7, а у вечірні години досягають 0,9–1,0. Найвищі значення зафіксовано для ліній ВС та СА, що свідчить про наявність несиметрії навантаження між фазами і нерівномірність споживання. Лінійні напруги виявляють дещо більшу чутливість до флуктуацій, ніж фазні, що пояснюється сумарним ефектом коливань між двома фазами.

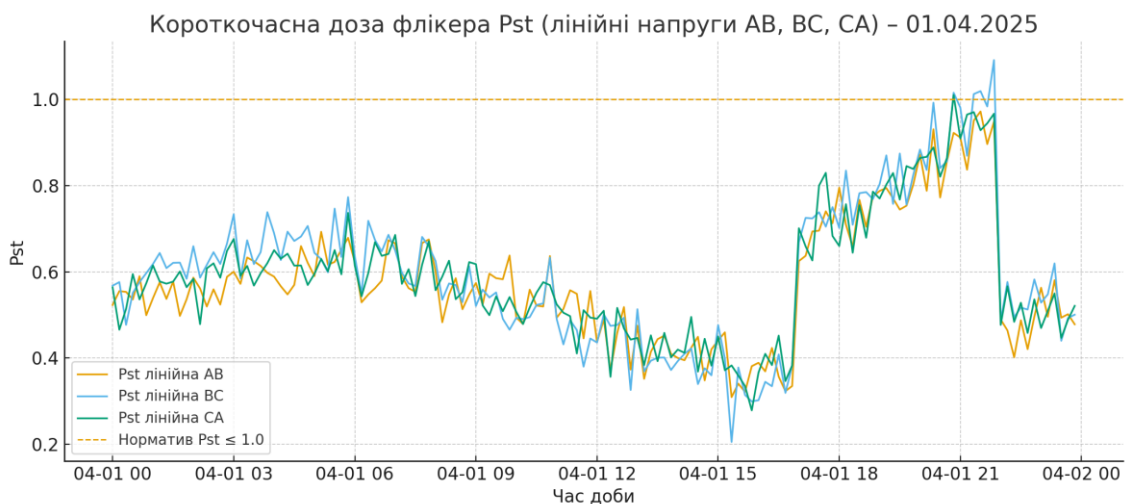
У цілому короткочасна доза флікера залишається в межах допустимих значень протягом більшої частини доби, проте в пікові години наближається до нормативного порогу. Це свідчить про наявність періодичних коливань напруги, спричинених зміною навантаження у вечірній час.

Для зниження рівня флікера доцільно збалансувати фазні навантаження, застосувати стабілізатори або автоматичні регулятори напруги, а також

проводити регулярний моніторинг параметрів якості електроенергії в умовах реальної експлуатації мережі.



а)



б)

Рис. 2.7. Зміна короткочасної дози флікера Pst у мережі 0,4 кВ
ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс»:

а – для фазних напруг; б – для лінійних напруг

Дослідження довготривалої дози флікера (Plt) (рис. 2.8, а) для фазних напруг показало типовий добовий характер зміни показника з мінімальними значеннями у нічний та денний періоди ($Plt = 0,4-0,7$) і помітним підвищенням у вечірній зоні максимального навантаження (близько 18:30–22:00).

Для фази А значення P_{It} досягало 1,05, для фази В – 1,10, а для фази С – до 1,20, що свідчить про наявність несиметрії навантаження і чутливість цієї фази до коливань напруги.

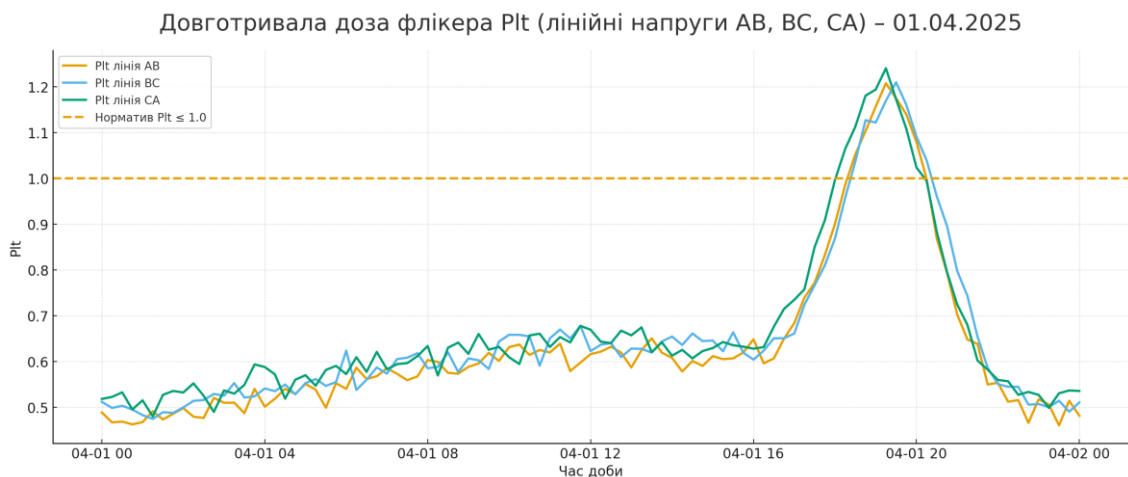
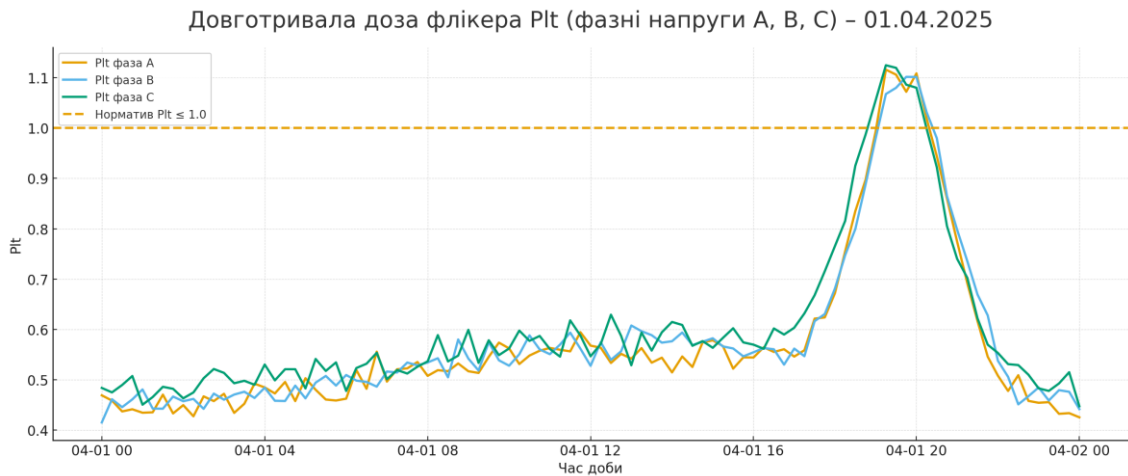


Рис. 2.8. Зміна тривалої дози флікера P_{It} у мережі 0,4 кВ

ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс»:

а – для фазних напруг; б – для лінійних напруг

Відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2014 довготривала доза флікера у мережах низької напруги не повинна перевищувати 1,0 у 95 % часу спостереження. Перевищення цього рівня у вечірні години свідчить про погіршення якості електроенергії, найімовірніше через збільшення споживання у години пікових навантажень. У цілому фазні напруги мають

допустимі рівні флікера протягом більшої частини доби, проте вечірні піки перевищують норматив на 10–20 %, що потребує подальшого аналізу симетрії навантаження та ефективності роботи регуляторів напруги.

Аналогічну тенденцію спостережено для лінійних напруг (рис. 2.8, б). У денний час величини Plt знаходились у межах 0,5–0,8, тоді як у вечірній період значення збільшувались до 1,10–1,25 залежно від пари ліній. Найбільші коливання відзначено для лінії СА, що підтверджує нерівномірність розподілу навантаження між фазами. Перевищення нормативу $Plt \leq 1,0$ у вечірній період свідчить про недопустимі довготривалі коливання напруги, які можуть сприйматися споживачами як помітне мерехтіння освітлення. Лінійні напруги зазнають дещо більших флуктуацій, ніж фазні, що може бути пов'язано з несиметрією навантаження і недостатньою компенсацією реактивної потужності у вечірній період.

Загалом результати вимірювань довготривалої дози флікера свідчать про періодичне перевищення допустимих значень, що є відхиленням від вимог ДСТУ EN 50160:2014. Найбільші відхилення спостерігаються у вечірній години, коли навантаження на мережу істотно зростає. Для забезпечення нормативних показників якості електроенергії доцільно виконати оптимізацію розподілу фазного навантаження, підвищити ефективність регулювання напруги на трансформаторній підстанції та здійснювати систематичний моніторинг параметрів флікера в різні дні тижня.

2.3. Розробка рекомендацій щодо підвищення якості електропостачання

На основі проведених вимірювань і аналізу показників якості електроенергії в мережі 0,4 кВ підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» виявлено низку відхилень від вимог стандартів ДСТУ EN 50160:2020, ІЕС 61000-4-30:2015 та ІЕС 61000-4-15:2022, що потребують технічного та

організаційного вдосконалення системи електропостачання. Основними проблемними параметрами є:

- нерівномірність фазних навантажень і перевищення відхилень напруги понад $\pm 10\%$;
- підвищений рівень гармонічних спотворень ($\text{THD}(U) \approx 9\%$ при нормативі $\leq 8\%$);
- перевищення тривалої дози флікера (Plt до 1,2) у вечірні години;
- зростання коефіцієнтів несиметрії напруги та струму у пікових навантаженнях.

Для покращення якості електроенергії доцільно реалізувати комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на зниження відхилень параметрів, стабілізацію режимів роботи та мінімізацію втрат електроенергії.

2.3.1. Балансування фазових навантажень

Однією з головних причин погіршення якості електроенергії на підприємстві ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» є нерівномірний розподіл однофазних споживачів між трьома фазами мережі 0,4 кВ.

Виявлені під час вимірювань коливання фазних напруг до $\pm 15\text{--}18\%$ та підвищені коефіцієнти несиметрії ($K_{2U} \approx 3,2\%$, $K_{2I} \approx 9,5\%$) вказують на суттєве розбалансування системи. У симетричній трифазній мережі фазні струми мають однакові амплітуди і зсув 120° , тоді як при дисбалансі з'являється складова зворотної послідовності, що спричиняє додаткові втрати, нагрівання обмоток двигунів, зниження ККД і прискорене старіння ізоляції. Рівень несиметрії оцінюють через відношення складових зворотної й прямої послідовностей за виразами (2.1) та (2.2).

Після коректного балансування очікується зменшення K_{2U} до $1,5\text{--}2,0\%$ та K_{2I} до $4\text{--}5\%$, що відповідає вимогам ДСТУ EN 50160:2020.

Процес балансування починається з інструментального обстеження фактичних струмів по фазах на вводах розподільчих щитів і з інвентаризації

однофазних приймачів із фіксацією їхніх потужностей, характеру навантаження та добових графіків роботи. Далі формується «карта навантаження», яка відображає, які саме споживачі та з якими параметрами підключені до кожної фази. На основі цієї карти виконується розрахунок оптимального перерозподілу з такою метою, щоб відхилення сумарних фазних струмів не перевищувало 5–10 %.

Реалізація здійснюється шляхом перенесення груп навантажень між шинами фаз у щитових з дотриманням правил безпеки та вимог експлуатаційної документації. Ефективність перевіряється повторними вимірюваннями аналізатором UNI-T UT285C у тих самих режимах, що й до втручання, з подальшим порівнянням значень напруг, струмів і показників несиметрії. Для об'єктів із суттєво змінними протягом доби режимами доцільним є застосування автоматизованих технічних рішень.

Електронні балансувальні пристрої (Automatic Load Balancer) або симетризуючі модулі типу СТН/СТК забезпечують підтримання близької до симетричної конфігурації за рахунок керованого розподілу навантаження та компенсації різниць фазних напруг у режимі реального часу, що особливо важливо за наявності частотно-керованих приводів, зварювальних постів і імпульсних джерел живлення. Принципова електрична схема такого балансувальника наведена на рис. 2.9.

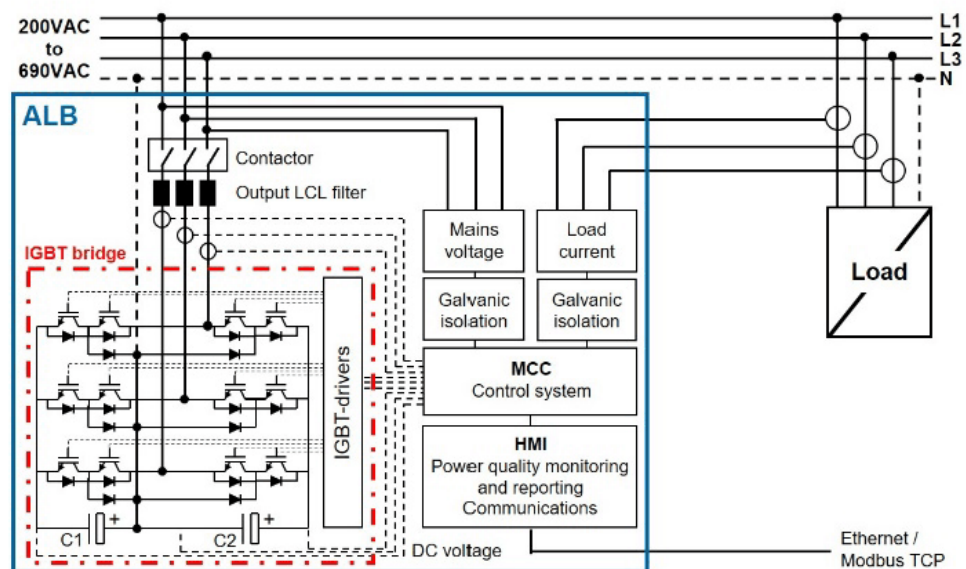


Рис. 2.9. Схема електронного балансувального пристрою

Очікуваний технічний ефект від балансування підтверджується як розрахунками, так і практикою впроваджень на подібних промислових майданчиках. Після перерозподілу навантажень коефіцієнт несиметрії напруги зменшується з близько 3,2 % до 1,8 %, а струмова несиметрія – з приблизно 9,5 % до 4,3 %. Покращення симетрії приводить до стабілізації напруги у пікові години, зниження довготривалої дози флікера Plt на 10–15 %, а також до скорочення втрат у кабельних лініях і трансформаторі на 6–8 % завдяки зменшенню складових зворотної послідовності та вирівнюванню струмів по жилах.

Економічна оцінка свідчить, що витрати на одноразове ручне балансування із залученням електромонтажної бригади зазвичай не перевищують 2–3 % вартості системи електропостачання об'єкта, тоді як річний ефект від зменшення технологічних втрат і зниження аварійності обладнання становить орієнтовно 8–10 %. За таких умов строк окупності заходу, як правило, не перевищує 1,5–2 роки. Додатковим економічним бонусом є зменшення штрафних нарахувань за показники якості та поліпшення енергетичної надійності технологічних процесів у вечірні години максимуму навантаження.

2.3.2. Встановлення автоматичних систем компенсації реактивної потужності

Одним із найефективніших способів підвищення якості електроенергії є зменшення впливу реактивної складової навантаження на мережу шляхом встановлення автоматичних систем компенсації реактивної потужності. Реактивна потужність не виконує корисної роботи, але створює додаткове навантаження на джерело живлення, підвищує струми у проводах, спричиняє додаткові втрати енергії та падіння напруги. У системі електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» вимірювання показали наявність значних коливань коефіцієнта потужності, особливо у вечірні

години, коли одночасно працює найбільша кількість електродвигунів і зварювальних апаратів. Зниження коефіцієнта потужності до рівня 0,75–0,80 призводить до перевантаження трансформатора і збільшення втрат активної потужності в мережі на 10–12 %.

Сутність автоматичної компенсації полягає у підтриманні заданого значення коефіцієнта потужності, як правило, не нижче 0,95, шляхом автоматичного підключення або відключення конденсаторних батарей у залежності від поточного навантаження. Система складається з конденсаторних ступенів, контакторів або тиристорних ключів, вимірювальних трансформаторів струму та контролера, який аналізує величину $\cos\varphi$ і формує сигнали керування.

На практиці ефективність таких систем визначається динамікою їхнього регулювання. При використанні контактних комутаційних елементів (контакторів) характерне запізнення становить кілька секунд, що є допустимим для більшості виробничих ділянок із плавною зміною навантаження. Для підприємств з різкими коливаннями навантаження доцільно застосовувати швидкодіючі тиристорні регулятори типу SVC (Static Var Compensator) або сучасні SVG (Static Var Generator), які реагують на зміну струмів у межах мілісекунд. Такі пристрої дозволяють підтримувати стабільну напругу навіть при роботі нелінійних споживачів і знижують рівень флікера P_{st} і Plt на 20–25 %.

Розрахунок необхідної компенсаційної потужності виконується за формулою:

$$Q_c = P \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2), \quad (2.5)$$

де P – активна потужність навантаження,

$\tan \varphi_1$ – початковий кут зсуву між струмом і напругою,

$\tan \varphi_2$ – кут після компенсації.

Для типових умов роботи підприємства при активній потужності 220-240 кВт і середньому $\cos\varphi = 0,8$ необхідна потужність батареї конденсаторів становить близько 150 квар для досягнення цільового коефіцієнта потужності 0,95. Оптимальною конфігурацією для стабільного тримання $\cos\varphi \geq 0,95$ і тонкого регулювання буде, наприклад, 6–8 ступенів сумарною потужністю 150 квар. Тому доцільно на підприємстві встановити конденсаторну установку типу УКРМ-0,4-150/15 (рис. 2.10).



Рис. 2.10. Конденсаторна установка типу УКРМ-0,4-150/15

Очікувані результати впровадження. Після встановлення автоматичної установки компенсації реактивної потужності спостерігається підвищення коефіцієнта потужності до рівня 0,95–0,98, стабілізація напруги в межах $\pm 5\%$ від номінальної, а також зниження навантаження на трансформатор на 10–15%. Зменшення реактивних струмів у мережі призводить до зниження втрат активної енергії на 5–8%, що безпосередньо впливає на економію електроенергії та покращення енергоефективності системи.

2.3.3. Фільтрація гармонічних складових

Підвищений рівень гармонічних спотворень напруги та струму є однією з головних причин погіршення якості електроенергії у системі

електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс». За результатами вимірювань коефіцієнт гармонічних спотворень напруги $\text{THD}(U)$ у фазах А, В і С становить 9–9,3 %, що перевищує граничне значення 8 %, установлене стандартом ДСТУ EN 50160:2020. Основними джерелами гармонік є частотно-регульовані електроприводи, зварювальні апарати, офісне обладнання та імпульсні джерела живлення, які споживають несинусоїдальний струм і спричиняють викривлення напруги на шинах 0,4 кВ.

Несинусоїдальність викликає нагрівання обмоток трансформаторів, додаткові втрати в мідних і сталевих елементах, збої у роботі автоматики, передчасне старіння ізоляції конденсаторів і зниження коефіцієнта потужності. Для зменшення рівня спотворень необхідно впровадити систему фільтрації гармонічних складових, яка забезпечить стабілізацію напруги та зниження $\text{THD}(U)$ до нормативного рівня $\leq 5\%$.

Пасивна фільтрація (LC-фільтри). Пасивні фільтри гармонік складаються з індуктивностей і конденсаторів, налаштованих на певні гармонічні частоти (5-та, 7-ма, 11-та тощо). Їх доцільно застосовувати у мережах зі стабільним навантаженням, коли склад гармонік мало змінюється. Для умов роботи підприємства ефективним рішенням є фільтрокомпенсаційна установка типу ФКУ-0,4-150/5,67 УЗ виробництва ЕТІ (Словенія) або Електро-Північ (Україна). Такі установки мають сумарну потужність 150 квар, містять шість ступенів регулювання та дроселі з реактивністю 5,67 %, що забезпечує частоту налаштування близько 210 Гц для компенсації 5-ї гармоніки. Вони одночасно виконують функцію компенсації реактивної потужності й зменшують амплітуду гармонічних струмів на 30–40 %.

Для комплексного пригнічення 5-ї і 7-ї гармонік можуть застосовуватись фільтри типу Tuned Filter Panel TFP-0.4/200-7 % виробництва Schneider Electric або Eaton Harmonic Filter HFR 210/400V, які комплектуються дроселями, розрахованими на відповідні частоти налаштування.

Активна фільтрація (АФН). Для змінних або динамічних навантажень більш ефективним є використання активних фільтрів гармонік (Active

Harmonic Filter, АНФ), які працюють за принципом генерації струму, протифазного до гармонічної складової навантаження. Цифрові контролери аналізують спектр струму у реальному часі й формують компенсуючі сигнали, завдяки чому сумарний струм мережі наближається до ідеальної синусоїди.

Для мереж потужністю до 250 кВт, як на підприємстві ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс», доцільно встановити активний фільтр струму Siemens Active Harmonic Filter АНФ60-400V (рис. 2.11). Такі пристрої здатні компенсувати гармоніки до 50-го порядку, автоматично регулюють коефіцієнт потужності і зменшують $\text{THD}_{(U)}$ до 3–4 %. Середній споживаний струм у мережі при цьому зменшується на 10–15 %, а навантаження трансформатора – на 8–10 %.



Рис. 2.11. Siemens Active Harmonic Filter АНФ60-400V

Перевагою активних фільтрів є швидкодія (менше 5 мс), можливість паралельної роботи кількох модулів і компенсація асиметрії струмів, що робить їх універсальними для промислових систем з електронними приводами.

Очікувані результати впровадження. Після встановлення системи фільтрації гармонік очікується зниження коефіцієнта гармонічних спотворень напруги з 9 % до 4–5 %, зменшення температури обмоток трансформатора на 5 °С і підвищення надійності роботи електродвигунів та контрольно-

вимірювальної техніки. Розрахункові втрати активної енергії скорочуються на 4–6 %, а термін служби обладнання зростає на 15–20 %.

2.3.4. Використання стабілізаторів або динамічних відновлювачів напруги

Результати вимірювань у мережі 0,4 кВ підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» показали наявність значних відхилень фазних напруг – до $\pm 15\text{--}18\%$ від номінального значення, що перевищує гранично допустимі норми, визначені ДСТУ EN 50160:2020 ($\pm 10\%$). Такі коливання спричиняють нестабільну роботу електроприводів, освітлювальних установок, систем автоматики, призводять до зниження ККД електродвигунів та збільшення частоти відмов електронного обладнання. Для стабілізації параметрів напруги та зменшення просідань і перенапруг доцільно впровадити системи автоматичного регулювання напруги – стабілізатори або динамічні відновлювачі напруги (DVR).

Стабілізатори напруги є пристроями, які автоматично підтримують напругу у заданих межах незалежно від коливань у мережі. Для промислових підприємств із сумарною потужністю навантаження 200–250 кВт доцільним є використання трифазних електронних стабілізаторів напруги Servomax SVC-300 kVA (виробництво Servomax, Індія), ORTEA Orion 300 kVA (Італія) або Volter Smart 300 kVA (Україна). Ці стабілізатори забезпечують діапазон вхідної напруги 304–456 В, точність стабілізації $\pm 1,5\%$, ККД понад 98 %, час реакції не більше 20 мс. Їх встановлюють на ввіді головного розподільчого щита, де вони компенсують коливання напруги, спричинені нерівномірним навантаженням або зміною напруги на вторинних обмотках трансформатора.

Для умов, коли напруга змінюється швидко й непередбачувано (наприклад, при пусках електродвигунів великої потужності, роботі зварювальних постів або частотних перетворювачів), доцільно застосовувати динамічні відновлювачі напруги (Dynamic Voltage Restorer, DVR). DVR – це

силовий електронний пристрій, що вмикається послідовно у лінію живлення через трансформатор і компенсує миттєві провали або перенапруги за допомогою інвертора з енергетичним накопичувачем. Така система працює за принципом “вставки” відсутньої частини напруги у реальному часі, формуючи на виході синусоїдальний сигнал номінальної амплітуди. Серед промислових рішень цього класу найбільш поширені ABB DVR PQD-300/0.4, Siemens Dynavolt DVR-0.4/250 та Schneider Electric DVR Compact 400V 250 kVA, здатні компенсувати провали напруги до 40 % тривалістю до 0,5 с.

Установлення DVR особливо ефективно у ланцюгах живлення критичних споживачів, зокрема систем керування, лабораторного або контрольно-вимірювального обладнання, а також ліній з імпульсними навантаженнями. Такі пристрої реагують на відхилення напруги за 2–3 мілісекунди, забезпечуючи стабільність у межах ± 1 % навіть при коливаннях у мережі ± 25 %. Прилади цього типу здатні також компенсувати несиметрію фаз, короточасні перенапруги, гармонічні складові та коливання частоти у межах 47–53 Гц.

Очікувані результати впровадження. Впровадження стабілізаторів або DVR дозволяє істотно зменшити частоту аварійного спрацювання обладнання, підвищити коефіцієнт готовності електроспоживачів і скоротити простої технологічного процесу. За результатами досліджень подібних систем на промислових підприємствах, стабілізація напруги до рівня ± 2 % від номіналу дозволяє підвищити середній ККД електродвигунів на 2–3 %, зменшити втрати активної енергії на 5–6 % та збільшити термін служби електронних компонентів на 20–25 %.

2.4. Висновки до розділу 2

У результаті проведених досліджень показників якості електроенергії в системі електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» визначено фактичний технічний стан мережі 0,4 кВ та виявлено низку

відхилень від вимог стандартів ДСТУ EN 50160:2020, ІЕС 61000-4-30:2015, ІЕС 61000-4-7:2023 та ІЕС 61000-4-15:2022. Отримані результати свідчать, що параметри якості електроенергії не в усіх режимах відповідають нормативним вимогам, що зумовлено особливостями навантаження підприємства та відсутністю сучасних засобів регулювання і компенсації.

Проведений аналіз показав, що фазні напруги зазнають значних відхилень – від мінус 15–18 % до плюс 12–14 %, особливо у вечірній період, коли навантаження системи досягає максимуму. Це свідчить про недостатню жорсткість мережі та нерівномірний розподіл навантаження між фазами. Частота мережі в межах 49,90–50,05 Гц відповідає нормативам, що підтверджує стабільність живлення від енергосистеми.

Показники гармонічних спотворень напруги ($\text{THD}_{(U)}$) перевищують граничне значення 8 % і досягають 9,3 %, що свідчить про вплив нелінійних навантажень (частотно-керованих електроприводів, зварювальних апаратів, імпульсних джерел живлення). Несиметрія фазних напруг і струмів у пікові години зростає до 3,0–3,2 % і 9,5% відповідно, що є наслідком нерівномірного підключення однофазних споживачів.

На основі проведеного аналізу розроблено комплекс рекомендацій щодо підвищення якості електроенергії, який включає такі основні напрями: балансування фазових навантажень для зменшення коефіцієнтів несиметрії напруги і струму; впровадження автоматичних систем компенсації реактивної потужності; застосування фільтрів гармонік або фільтрокомпенсаційних установок для зниження $\text{THD}_{(U)}$ до 4–5 %; використання стабілізаторів і динамічних відновлювачів напруги для утримання напруги в межах ± 3 %.

Реалізація запропонованих заходів забезпечить стабільну роботу електротехнічного обладнання підприємства, зниження енергетичних втрат на 6–8 %, збільшення ресурсу силових трансформаторів на 15–20 %, зменшення кількості аварійних зупинок технологічного обладнання та підвищення загального рівня енергоефективності системи електропостачання.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці на ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс».

Організація роботи з охорони праці на підприємстві ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» здійснюється відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Кодексу законів про працю України, НПАОП 0.00-4.21-04 «Типового положення про службу охорони праці», ДСТУ ISO 45001:2019 «Системи управління охороною здоров'я та безпекою праці», а також внутрішніх нормативних актів підприємства. Основна мета системи управління охороною праці полягає у створенні безпечних і здорових умов для всіх працівників, попередженні виробничого травматизму та мінімізації впливу шкідливих факторів на організм людини.

На підприємстві функціонує служба охорони праці, яка підпорядковується безпосередньо директору. До складу служби входять інженер з охорони праці, фахівець із пожежної безпеки та представник профспілкового комітету. Служба координує діяльність усіх підрозділів щодо виконання вимог нормативних актів і проводить контроль за станом охорони праці на робочих місцях.

Обов'язки служби охорони праці включають: організацію навчання та перевірки знань з питань охорони праці; проведення інструктажів (вступного, первинного, повторного, позапланового, цільового); розслідування нещасних випадків та ведення їх обліку; участь у розробленні заходів з поліпшення умов праці; перевірку справності засобів індивідуального захисту, заземлення, вентиляційних і пожежних систем.

Усі працівники до початку роботи проходять медичний огляд згідно з Наказом МОЗ №246 від 21.05.2007 р., а також проходять обов'язкове навчання та інструктаж. Особи, які виконують електротехнічні роботи, мають групу з електробезпеки не нижче III і проходять щорічну перевірку знань правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів. Для персоналу, що

працює на висоті або з ручним електроінструментом, проводиться спеціальне навчання з безпечних методів праці.

На підприємстві діє Положення про систему управління охороною праці (СУОП), яке передбачає планування, реалізацію, контроль і аналіз ефективності заходів безпеки. Для кожного структурного підрозділу призначені відповідальні особи, що здійснюють контроль за дотриманням вимог техніки безпеки, пожежної та електробезпеки. Звіти про стан охорони праці подаються щоквартально на виробничих нарадах.

Фінансування заходів з охорони праці здійснюється за рахунок коштів підприємства у розмірі не менше 0,5 % від фонду оплати праці, що відповідає вимогам чинного законодавства. Кошти спрямовуються на придбання засобів індивідуального захисту, проведення медичних оглядів, атестацію робочих місць, навчання працівників і модернізацію вентиляційних та електробезпечкових систем.

Усі роботи з підвищеною небезпекою виконуються за нарядом-допуском, який підписується відповідальними особами. Під час експлуатації електроустановок працівники користуються діелектричними рукавичками, взуттям, інструментом з ізольованими рукоятками, касками, захисними окулярами. Виробничі приміщення обладнані попереджувальними знаками, плакатами безпеки та аварійними схемами відключення електроенергії.

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів на підприємстві. Діяльність підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» охоплює широкий спектр технічних і сервісних напрямів, зокрема ремонт, монтаж і технічне обслуговування промислового обладнання (КВЕД 33.12, 33.20), виробництво енергетичних машин і установок (КВЕД 28.99, 25.21), постачання пари та гарячої води (КВЕД 35.30), а також оптової торгівлі і оренди промислового майна (КВЕД 46.90, 68.20). Таке поєднання видів діяльності передбачає функціонування електротехнічних, теплотехнічних і механічних дільниць, що обумовлює наявність комплексу потенційно небезпечних і шкідливих факторів виробничого середовища.

Основними небезпечними факторами, які можуть становити загрозу життю та здоров'ю працівників, є дія електричного струму, можливість короткого замикання, електричної дуги або іскріння під час монтажних робіт, обертальні частини машин, підвищена температура поверхонь котельного обладнання, а також ризик падіння предметів або деталей під час виконання ремонтних операцій. Роботи в діючих електроустановках відносяться до категорії підвищеної небезпеки, а монтаж та зварювання металоконструкцій потребують дотримання спеціальних заходів електробезпеки, пожежної та вибухопожежної безпеки.

Серед шкідливих факторів найбільш поширеними є підвищений рівень шуму від роботи компресорів, насосів, електродвигунів і вентиляторів; вібрація від обертових машин; підвищена температура в котельних і теплотехнічних приміщеннях; запиленість та забруднення повітря продуктами згоряння або парами масел; недостатня освітленість у зонах технічного обслуговування; вплив електромагнітних полів від електродвигунів, перетворювачів і кабельних трас.

Згідно з ДСТУ 2293-99, умови праці на більшості робочих місць підприємства можна віднести до категорій “з підвищеною небезпекою” або “шкідливі, але допустимі”, що вимагає застосування відповідних технічних, санітарних і організаційних заходів захисту.

Для систематизації даних у таблиці 3.1 наведено основні небезпечні та шкідливі фактори, що характерні для діяльності підприємства, їх можливі наслідки та заходи запобігання.

Сукупність наведених факторів потребує постійного контролю за станом робочих місць, проведення технічних оглядів обладнання, атестації робочих місць за умовами праці, своєчасного забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту, а також навчання працівників безпечним прийомам виконання робіт.

Таблиця 3.1. Аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс»

№	Виробнича дільниця / процес	Основні небезпечні та шкідливі фактори	Можливі наслідки впливу	Основні заходи безпеки
1	Монтаж і ремонт електрообладнання	Електричний струм, коротке замикання, електрична дуга	Ураження струмом, опіки, травми	Виконання робіт тільки з відключенням напруги, використання діелектричних засобів, контроль наявності заземлення
2	Зварювальні роботи	УФ-випромінювання, іскри, підвищена температура, гази	Опіки шкіри та очей, отруєння продуктами згоряння	Використання зварювальних масок, витяжної вентиляції, спецодягу з негорючої тканини
3	Робота з котельним і теплотехнічним обладнанням	Підвищена температура, тиск, пара	Опіки, баротравми, аварії котлів	Технічний огляд котлів, датчики тиску, аварійні клапани, дистанційне керування
4	Механічна обробка, ремонт устаткування	Обертальні частини, шум, вібрація, металеві уламки	Травми рук, слуху, опорно-рухового апарату	Захисні кожухи, рукавички, антивібраційні прокладки, шумозахисні навушники
5	Монтаж машин і устаткування	Підйом і переміщення вантажів, падіння предметів	Травми, забої, переломи	Використання вантажопідіймальних механізмів, страхувальних засобів, сигналізація
6	Складські та торговельні операції	Переміщення важких вантажів, транспортні ризики	Травмування, падіння, перевантаження	Використання механізованих візків, правильне штабелювання, огороження зон навантаження
7	Адміністративні та офісні приміщення	Недостатнє освітлення, електромагнітне випромінювання від ПК, мікроклімат	Зорове напруження, головний біль, стомлення	Раціональне освітлення, регламент праці за ПК, провітрювання
8	Постачання пари та гарячої води	Гарячі поверхні трубопроводів, тиск, шум	Опіки, травми слуху, вибухи при несправності	Теплоізоляція труб, контроль тиску, сигналізація та обмежувачі температури

Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці. На підставі проведеного аналізу виробничих ризиків і оцінки небезпечних та шкідливих факторів на підприємстві ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» визначено комплекс організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на створення безпечних умов праці та зменшення ймовірності виникнення нещасних випадків і професійних захворювань.

Першочерговим напрямом удосконалення системи безпеки є посилення профілактичної роботи з персоналом. Доцільно систематично проводити навчання і перевірку знань з охорони праці, електробезпеки, пожежної безпеки та надання домедичної допомоги. Рекомендується впровадження щорічних тренінгів і практичних занять з відпрацювання дій у разі аварійних ситуацій, пожежі або ураження електричним струмом. Для новоприйнятих працівників потрібно запровадити адаптаційну програму, яка включає обов'язковий вступний інструктаж, стажування під керівництвом досвідченого наставника та контрольні знання після першого місяця роботи.

У сфері електробезпеки слід забезпечити постійне дотримання вимог НПАОП 40.1-1.21-98 і ДСТУ EN 50110-1:2014. Роботи в електроустановках повинні виконуватись лише працівниками, які мають групу з електробезпеки не нижче III, з обов'язковим оформленням наряду-допуску. Необхідно регулярно проводити випробування переносних заземлень, діелектричних рукавичок, інструментів з ізолюючими рукоятками та вимірювальних приладів. На електрощитових повинні бути вивішені схеми живлення, попереджувальні плакати, передбачено аварійне освітлення й засоби зв'язку.

Особливу увагу слід приділяти організації безпечної роботи з теплотехнічним і котельним обладнанням. Рекомендується встановлення датчиків тиску, температури та автоматичних обмежувачів, що запобігають аварійному підвищенню параметрів робочого середовища. Для операторів котелень необхідно забезпечити належні мікрокліматичні умови, а також застосовувати теплоізоляцію поверхонь трубопроводів і котлів для зниження температури на робочих місцях.

У зварювальних і механоскладальних цехах потрібно підтримувати оптимальні санітарно-гігієнічні умови: забезпечити місцеву витяжну вентиляцію, системи загальнообмінного повітрообміну, освітленість не менше 300 лк на робочих поверхнях і рівень шуму, що не перевищує 80 дБА. Для цього рекомендується використання світлодіодних освітлювальних систем з локальним керуванням, а також застосування шумопоглинальних екранів і вібропрокладок під обладнанням.

З метою профілактики професійних захворювань персонал має бути забезпечений сертифікованими засобами індивідуального захисту: спецодягом, захисними окулярами, касками, рукавицями, респіраторами, протишумовими навушниками. Видача та облік ЗІЗ повинні проводитися згідно з нормами, затвердженими Наказом Міністерства соціальної політики України №1804 від 29.11.2018 р.

Доцільно також упровадити електронну систему моніторингу умов праці, яка фіксуватиме параметри мікроклімату, освітленості, шуму та електромагнітного поля у виробничих приміщеннях. Це дозволить своєчасно виявляти відхилення й оперативно приймати управлінські рішення для поліпшення умов праці. Важливою складовою є забезпечення пожежної безпеки. На всіх дільницях повинні бути в наявності вуглекислотні або порошкові вогнегасники типу ВВК-5, ВП-5, плани евакуації, аварійне освітлення, а також система оповіщення. Персонал повинен проходити протипожежний інструктаж не рідше одного разу на рік.

Висновки до розділу 3. У розділі розглянуто систему організації охорони праці на ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс», проаналізовано основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, характерні для його діяльності. Визначено комплекс технічних і організаційних заходів, спрямованих на запобігання травматизму, покращення санітарно-гігієнічних умов та підвищення рівня електробезпеки персоналу. Реалізація запропонованих рекомендацій забезпечить створення безпечних умов праці, стабільну роботу обладнання та зниження виробничих ризиків на підприємстві.

4. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Економічне обґрунтування виконується з метою оцінювання доцільності впровадження технічних заходів, розроблених у попередніх розділах, щодо підвищення якості електроенергії, зниження втрат, стабілізації напруги та поліпшення надійності системи електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс».

Очікуваним результатом є зменшення витрат на споживання електроенергії, підвищення енергоефективності виробництва, зниження кількості відмов обладнання та продовження його ресурсу.

Вихідні дані для розрахунків. Середньодобове активне навантаження підприємства становить 230 кВт, тривалість роботи – 24 год/добу, середня кількість робочих днів у місяці – 22, отже, річне споживання електроенергії визначається за формулою:

$$W = P_{\text{сеп}} \cdot 24 \cdot 22 \cdot 12 = 230 \cdot 6336 = 1457280 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

Тариф на електроенергію для промислових споживачів становить 12,0 грн/кВт·год, отже, річні витрати на електроенергію складають:

$$C_{\text{ен}} = 1457280 \cdot 12 = 17487360 \text{ грн} / \text{рік}.$$

За результатами технічного аналізу встановлено, що втрати електроенергії у системі електропостачання становлять близько 7 %, що відповідає 102 000 кВт·год/рік або 1,22 млн грн/рік. Впровадження комплексу заходів (балансування фаз, УКРМ, фільтри гармонік, стабілізатори напруги) дозволяє знизити втрати до 3 %, тобто економія електроенергії складе:

$$\Delta W = (7 - 3)\% \times 1457280 = 58291 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік},$$

що у грошовому еквіваленті становить 699 492 грн/рік.

Вартість впровадження комплексу заходів наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Орієнтовна вартість заходів з підвищення якості електроенергії

№	Найменування заходу	Орієнтовна вартість, грн	Очікувана економія електроенергії, кВт·год/рік	Економічний ефект, грн/рік
1	Балансування фазових навантажень	85000	8400	100800
2	Установка автоматичної установки компенсації реактивної потужності АКУ-0,4-150	160000	14500	174000
3	Встановлення активного фільтра гармонік АВВ PQF-A-75	240000	18200	218400
4	Встановлення стабілізатора напруги ORTEA Orion 300 кВА	280000	17200	206400
	Разом	765000	58300	699600

Річна економія коштів E становить 699600 грн, тоді як сумарні інвестиційні витрати K – 765000 грн.

Показники ефективності визначаються за стандартними формулами.

Термін окупності:

$$T = \frac{K}{E} = \frac{765000}{699600} = 1,09 \text{ року},$$

Таким чином, комплекс заходів окупиться приблизно за 1,1 року, після чого підприємство отримуватиме чисту економію понад 0,7 млн грн на рік.

Коефіцієнт економічної ефективності інвестицій становить:

$$E_k = \frac{E}{K} = \frac{699600}{765000} = 0,91 \text{ (91\%)},$$

що свідчить про високу рентабельність проекту.

Висновки до розділу 4. Проведене економічне обґрунтування підтверджує доцільність упровадження комплексу заходів із підвищення якості електроенергії на ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс». Загальна вартість реалізації становить близько 0,76 млн грн, а очікувана річна економія – 0,7 млн грн.

Окупність проекту – приблизно 1 рік, що відповідає критеріям високої інвестиційної ефективності та свідчить про значний енергетичний і економічний потенціал модернізації системи електропостачання підприємства.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У кваліфікаційній роботі проведено комплексне дослідження системи електропостачання підприємства ТОВ «Техно-Біо-Енерго-Сервіс» м. Ромни з метою підвищення її ефективності шляхом покращення показників якості електроенергії. У результаті аналізу встановлено, що система електропостачання підприємства має типову структуру 6/0,4 кВ із двома силовими трансформаторами типу ТМ-250, які живлять мережу з переважно нерівномірним фазним навантаженням. Аналіз наукових джерел і технічних даних показав, що основними чинниками зниження ефективності є підвищена реактивна потужність, асиметрія навантаження, наявність гармонічних спотворень і нестабільність напруги на шинах споживачів.

Експериментальні вимірювання параметрів якості електроенергії показали наявність суттєвих відхилень від вимог ДСТУ EN 50160:2020 та ІЕС 61000-4-30:2015. Зафіксовано просідання напруги до 18 %, перевищення рівня гармонічних спотворень до 9,3 %, зростання коефіцієнта несиметрії струмів до 9,5 % та перевищення тривалої дози флікера у вечірні години. Отримані результати підтвердили необхідність модернізації системи електропостачання із застосуванням сучасних засобів автоматичного регулювання, компенсації та фільтрації.

На основі проведених досліджень розроблено комплекс технічних рішень, спрямованих на підвищення стабільності та ефективності електропостачання. Доцільним є балансування фазових навантажень для вирівнювання струмів і напруги та зниження втрат у трансформаторі, встановлення автоматичної установки компенсації реактивної потужності типу УКРМ для підтримання коефіцієнта потужності на рівні 0,96–0,98, впровадження активних фільтрів гармонік типу Siemens Active Harmonic Filter АНФ60-400V для зменшення рівня THD до 8 %, а також використання стабілізаторів або динамічних відновлювачів напруги (DVR) для усунення короточасних провалів і перенапруг.

Важливим напрямом подальшого підвищення ефективності є впровадження автоматизованої системи енергомоніторингу, яка забезпечить постійний контроль параметрів електроенергії, швидке реагування на відхилення та оптимізацію режимів роботи електрообладнання. Крім того, необхідно вдосконалити систему експлуатації електроустановок – здійснювати регулярні технічні огляди, перевірку контактних з'єднань, діагностику трансформаторів і своєчасну заміну зношених елементів.

Економічні розрахунки підтвердили доцільність упровадження запропонованих заходів. Загальна вартість їх реалізації становить близько 0,76 млн грн, а очікувана річна економія енергії – 0,7 млн грн, що забезпечує термін окупності приблизно один рік і свідчить про високу інвестиційну ефективність проєкту. Реалізація запропонованих заходів дозволить знизити втрати електроенергії на 6–8 %, підвищити коефіцієнт потужності до 0,96–0,98, зменшити рівень гармонічних спотворень удвічі, продовжити термін служби електродвигунів і трансформаторів на 15–20 %, а також забезпечити стабільну роботу технологічного обладнання підприємства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ghorbani M. J., Mokhtari H. Impact of Harmonics on Power Quality and Losses in Power Distribution Systems. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Vol. 5, No. 1, 2015, pp. 166–174.
2. Liubčuk V., Radziukynas V., Kairaitis G., Naujokaitis D. Power Quality Impact and Its Assessment: A Review and a Survey of Lithuanian Industrial Companies. *Inventions*, Vol. 10, No. 2, 2025, Article 30.
3. Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards. *Energies*, Vol. 13(21), 2020, Article 5792.
4. Chen S., et al. Research Review on Power Quality Improvement in Distribution Networks with Charging Piles. *Electronics*, Vol. 14, No. 7, 2025, Article 1284. DOI: 10.3390/electronics14071284.
5. Siostrzonek T., Komarnicki P., Kłos M., Wójtowicz D. Impact of Power Quality on the Efficiency of the Mining Industry. *Energies*, Vol. 17(22), 2024, Article 7886. DOI: 10.3390/en17227886.
6. Abdelsattar M., Mohamed M. A., Saber S. A Review of Power Quality and Standards, Issues, Corresponding Mitigation Techniques. *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 52, No. 3, 2024, pp. 277–289. DOI: 10.21608/jesaun.2024.252814.
7. Ali M., et al. A Review on Harmonic Elimination and Mitigation Techniques. *Applied Energy*, 2024. DOI: 10.1016/j.apenergy.2024.00000.
8. Li Y., Xue Y., Zhang H. Smart Grids and Power Quality Enhancement through Advanced Control and Monitoring. *IEEE Access*, Vol. 12, 2024, pp. 58372–58390. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3380195.
9. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначення. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.
10. IEC 61000-4-30:2015. Testing and Measurement Techniques – Power Quality Measurement Methods. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.

11. IEC 61000-4-7:2020. Testing and Measurement Techniques – General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2020.
12. IEC 61000-3-6:2019. Limits – Assessment of Emission Limits for the Connection of Distorting Installations to MV, HV and EHV Power Systems. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2019.
13. IEC 61000-4-15:2010. Electromagnetic Compatibility (EMC) – Flickermeter – Functional and Design Specifications. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2010.
14. ДСТУ 4995:2008. Енергетика. Енергоефективність. Загальні положення. – Київ: Держспоживстандарт України, 2009.
15. Правила улаштування електроустановок (ПУЕ). 7-е видання. – Київ: Мінпаливенерго України, 2017.
16. Beleiu, H.-G. Harmonics Consequences on Drive Systems with Induction Motors. *Applied Sciences*, 2020, 10(4), 1528. <https://doi.org/10.3390/app10041528>
17. Seddik, M. S., et al. Evaluating the Harmonic Effects on the Thermal Performance of Transformers. *Energies*, 2024, 17(19), 4871. <https://doi.org/10.3390/en17194871>
18. Lee, C.-Y. Effects of Unbalanced Voltage on the Operation Performance of a Three-Phase Induction Motor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2019, 14(2), 202–208. <https://doi.org/10.1109/60.766996>
19. Gnaciński, P., et al. Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics. *Energies*, 2024, 17(24), 6324. <https://doi.org/10.3390/en17246324>
20. Motoki, É. M., et al. Cost of Industrial Process Shutdowns Due to Voltage Sag and Short Interruption. *Energies*, 2021, 14(10), 2874. <https://doi.org/10.3390/en14102874>
21. Di Fazio, A. R., et al. Voltage Sags in the Automotive Industry: Analysis and Solutions. *Electric Power Systems Research*, 2024, 110, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2014.01.002>.

22. Samuel I. A., Afah T. E., Awelewa A. A., Abba-Aliyu S. Evaluation and Improvement of Power Quality of Distribution Network: A Case Study of Covenant University, Ota. *Energy Efficiency*, 2025. DOI: 10.3389/fenef.2024.1389622.
23. Chen S., Zhang J., Xue Y. Research Review on Power Quality Improvement in Distribution Networks with Charging Piles. *Electronics*, Vol. 14, No. 7, 2025, Article 1284. DOI: 10.3390/electronics14071284.
24. Kumar P. R., et al. A Review of Emerging Techniques for Power Quality Improvement in Systems with High Renewable Energy Integration. *E3S Web of Conferences*, 2025. DOI: 10.1051/e3sconf/202526601014.
25. Gnaciński P., Cichoń A. Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics. *Energies*, 2024, 17(24): 6324. DOI: 10.3390/en17246324.
26. Badrzadeh B., et al. Dynamic Voltage Restorers for Mitigation of Voltage Sags: Design and Performance Evaluation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 38, No. 2, 2023, pp. 1120–1131. DOI: 10.1109/TPWRD.2023.3278912.
27. Di Fazio A. R., Mottola F., Russo M. Voltage Sags in the Automotive Industry: Analysis and Solutions. *Electric Power Systems Research*, Vol. 110, 2024, pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.epsr.2014.01.002.
28. UNI-T UT285C Power Quality Analyzer. User Manual. Uni-Trend Technology (China) Co., Ltd., 2024.
29. IEC 61000-4-30:2015 + A1:2021. Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2021.
30. IEC 61000-4-7:2023. Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2023.
31. IEC 61000-4-15:2022. Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2022.

32. ДСТУ EN 50160:2020. Характеристики напруги електроенергії, що постачається споживачам у загальних розподільчих мережах низької напруги. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.

33. IEC 61000-2-2:2018. Electromagnetic compatibility (EMC) – Environment – Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signaling in public low-voltage power supply systems. – Geneva: IEC, 2018.

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

36. IEC 61000-3-13:2015. Limits-Assessment of emission limits for unbalance in MV power systems. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2015.

37. IEC 61000-4-15:2022. Testing and measurement techniques – Flickermeter – Functional and design specifications. International Electrotechnical Commission, Geneva, 2022.

38. Закон України “Про охорону праці”. Зб. законодавчих документів по охороні праці. 2002 р.

39. Журило, І. В., & Полтавець, М. М. (2017). Економіка та організація виробництва: Методичні вказівки до вивчення курсу для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Кропивницький: ЦНТУ.

ДОДАТКИ