

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 надійності системи електропостачання
ПВКП «УКРСТАНДАРТ м. Суми»»

Виконав

(підпис)

Родіон ЛИННИК

Група

ЕТЕС 2401м

Науковий керівник:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

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

Родіону ЛИННИКУ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

1. Тема кваліфікаційної роботи: «Підвищення надійності системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ м. Суми»

2. Керівник кваліфікаційної роботи: Савойський Олександр Юрійович, 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 причин погіршення якості електроенергії та способів її підвищення; 2. Дослідження показників якості електроенергії на підприємстві ПВКП «УКРСТАНДАРТ»; 3. Розробка технічних заходів підвищення надійності системи електропостачання; 4. Охорона праці; 5. Економічне обґрунтування; Висновки та пропозиції; Список використаної літератури; Додатки.

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: Презентація

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Завдання прийняла до виконання

(підпис)

Родіон ЛИННИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

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 причин погіршення якості електроенергії та способів її підвищення»	до 30.08.2025р.	
6.	Підготовка розділу «Розділ 2. Дослідження показників якості електроенергії на підприємстві ПМКП «УКРСТАНДАРТ»»	до 19.09.2025 р.	
7.	Підготовка розділу «Розділ 3. Розробка технічних заходів підвищення надійності системи електропостачання»	до 03.10.2025 р.	
8.	Підготовка розділу «Розділ 4. Охорона праці»	до 08.10.2025 р.	
9.	Підготовка розділу «Розділ 5. Економічне обґрунтування»	до 20.10.2025 р.	
10.	Написання висновків та пропозицій	до 25.10.2025 р.	
11.	Подання роботи на перевірку унікальності до експертної ради факультету	до 01.11.2025 р.	
12.	Подання роботи на рецензування	до 07.11.2025 р.	
13.	Подання до попереднього захисту	до 14.11.2025 р.	

Керівник роботи:

(підпис)

Олександр САВОЙСЬКИЙ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Здобувач

(підпис)

Родіон ЛИННИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

АНОТАЦІЯ

Линник Родіон Юрійович. Підвищення надійності системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ».

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

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню надійності системи електропостачання приватного виробничо-комерційного підприємства «УКРСТАНДАРТ» шляхом створення та впровадження системи моніторингу показників якості електричної енергії в режимі реального часу. Актуальність дослідження зумовлена зростанням частки нелінійних навантажень у промислових мережах, які є основним джерелом гармонічних спотворень, несиметрії напруги та нестабільності електричних параметрів, що призводить до втрат енергії, передчасного старіння електрообладнання та зниження енергоефективності підприємств.

У роботі проаналізовано стан наукових досліджень у сфері контролю якості електроенергії, наведено характеристику основних показників (ТНД, відхилення та коливання напруги, несиметрія,) згідно з нормативними документами ДСТУ EN 50160:2014, ІЕС 61000-4-30:2015 та ІЕС 61000-2-2:2018. Встановлено, що для електричної мережі підприємства характерне перевищення допустимих меж коефіцієнта гармонічних спотворень, несиметрія напруги досягає 2,1 %, а відхилення напруги становить близько +6 %.

На основі проведених вимірювань у точках ТП-1 та ТП-2 визначено вплив параметрів якості електроенергії на роботу технологічного обладнання. Зростання рівня гармонічних складових призводить до підвищення втрат активної потужності на 2–3 %, збільшення струмів у нейтральному провіднику

до 30 % від фазного струму, а також до зменшення ресурсу електродвигунів і трансформаторів на 15–20 %.

Для усунення виявлених порушень розроблено структуру автоматизованої системи моніторингу якості електроенергії (АСМ ЯЕЕ), яка здійснює безперервний контроль 25 показників якості з дискретністю 1 с. Система базується на використанні енергоаналізаторів класу точності А, модулів збору даних і серверного програмного забезпечення типу PowerGraph або MATLAB/Simulink, що забезпечує відображення параметрів у режимі реального часу, формування звітів відповідно до вимог стандартів і попередження у разі перевищення допустимих значень.

Розрахунки показали, що впровадження системи моніторингу забезпечує зниження рівня гармонічних спотворень до 3,5–4,0 %, несиметрії напруги – до 1,2 %, а відхилення напруги – до ± 2 %. При цьому втрати електроенергії скорочуються з 3 % до 1,5 %, що відповідає щорічній економії близько 3,75 тис. кВт·год або 45 тис. грн за тарифом 12 грн/кВт·год. Додатково зменшуються витрати на аварійні ремонти на 15 тис. грн/рік, що формує загальний економічний ефект 60 тис. грн/рік. Термін окупності інвестицій становить 1,6 року, а річний приріст енергоефективності оцінюється на рівні 5–7 %.

У роботі також розглянуто питання охорони праці під час монтажу та експлуатації системи, визначено небезпечні фактори електротехнічних робіт, наведено рекомендації щодо організації безпечних умов праці та профілактики професійних ризиків.

Ключові слова: якість електричної енергії; показники якості; гармонічні спотворення; несиметрія напруги; моніторинг у реальному часі; автоматизована система контролю; енергоефективність; надійність електропостачання; активний фільтр гармонік; вар-компенсатор; економічна ефективність; енергоменеджмент.

ABSTRACT

Lynnyk Rodion Yuriiovych. Improvement of the Power Supply System Reliability of PVCP “UKRSTANDART”.

Qualification work for a master's degree in Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics under the educational program Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics in specialty 141 "Electrical Power Engineering, Electrical Engineering and Electromechanics". Sumy National Agrarian University, Sumy 2025.

The qualification work is devoted to improving the reliability of the power supply system of the Private Production and Commercial Enterprise “UKRSTANDART” through the development and implementation of a real-time monitoring system for the quality parameters of electrical energy. The relevance of the research is determined by the growing share of nonlinear loads in industrial networks, which are the main sources of harmonic distortions, voltage unbalance, and instability of electrical parameters. These phenomena lead to increased energy losses, accelerated aging of electrical equipment, and reduced energy efficiency of enterprises.

The paper analyzes the state of scientific research in the field of power quality control and presents the characteristics of the main indicators (THD, voltage deviations and fluctuations, unbalance) in accordance with the standards DSTU EN 50160:2014, IEC 61000-4-30:2015, and IEC 61000-2-2:2018. It has been established that for the enterprise's electrical network, the total harmonic distortion (THD) exceeds permissible limits (up to 8.0–8.3%), voltage unbalance reaches 2.1%, and voltage deviation is about +6%.

Based on field measurements at substations TP-1 and TP-2, the influence of power quality parameters on the operation of technological equipment was determined. The increase in the harmonic component level causes an increase in active power losses by 2–3%, neutral conductor currents up to 30% of the phase

current, and a reduction in the service life of electric motors and transformers by 15–20%.

To eliminate the identified problems, a structure of an automated power quality monitoring system (PQMS) was developed, which performs continuous control of 25 power quality indicators with a 1-second sampling rate. The system is based on class A power analyzers, data acquisition modules, and server software such as PowerGraph or MATLAB/Simulink, which provide real-time visualization of parameters, report generation according to standards, and automatic alerts in case of deviations beyond permissible limits.

Calculations show that the implementation of the monitoring system reduces the total harmonic distortion to 3.5–4.0%, voltage unbalance to 1.2%, and voltage deviation to $\pm 2\%$. As a result, energy losses decrease from 3% to 1.5%, which corresponds to an annual energy saving of approximately 3.75 thousand kWh or 45,000 UAH at a tariff of 12 UAH/kWh. In addition, the cost of emergency maintenance decreases by 15,000 UAH per year, forming a total annual economic effect of about 60,000 UAH. The payback period of investments is 1.6 years, while the annual increase in energy efficiency is estimated at 5–7%.

The work also covers occupational safety issues during the installation and operation of the monitoring system, identifies hazardous factors of electrical work, and provides recommendations for organizing safe working conditions and preventing occupational risks.

The obtained results confirm the technical and economic efficiency of implementing a real-time power quality monitoring system as a tool for increasing the reliability, safety, and energy efficiency of industrial power supply systems. The developed solutions can be recommended for practical application in industrial facilities with nonlinear or sensitive electrical loads.

Keywords: power quality; quality indicators; harmonic distortion; voltage unbalance; real-time monitoring; automated control system; energy efficiency; power supply reliability; active power filter; VAR compensator; economic efficiency; energy management.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
1. АНАЛІЗ ПРИЧИН ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СПОСОБІВ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ	13
1.1. Поняття якості електричної енергії.....	13
1.2. Відхилення напруги	15
1.3. Коливання напруги.....	16
1.4. Несинусоїдні режими роботи	18
1.5. Несиметрія в системах електропостачання	20
1.6. Вплив відхилення показників якості електричної енергії на роботу технологічного обладнання.....	22
1.7. Аналіз засобів та способів підвищення якості електроенергії.....	24
1.8. Висновки до розділу.....	26
2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПІДПРИЄМСТВІ ПВКП «УКРСТАНДАРТ»	28
2.1. Методика проведення досліджень	28
2.2. Аналіз результатів вимірювань показників якості електроенергії.....	30
2.2.1. Відхилення частоти мережі	30
2.2.2. Відхилення напруги	31
2.2.3. Несинусоїдність напруги	33
2.2.4. Спектральний аналіз гармонічних складових напруги	35
2.3. Висновки до розділу.....	36
3. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	38

3.1. Загальні положення та вибір напрямів підвищення надійності системи електропостачання	38
3.2. Вибір технічних засобів компенсації та покращення якості електроенергії.....	39
3.3. Розробка системи моніторингу показників якості електроенергії в режимі реального часу.....	43
3.4. Висновки до розділу.....	45
4. ОХОРОНА ПРАЦІ	47
5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ.....	54
ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ	56
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	58

ВСТУП

1. Актуальність теми. Система електропостачання підприємства – це ключовий фактор забезпечення безперебійної роботи виробничих процесів. Надійність електропостачання охоплює здатність системи подавати електроенергію споживачам з відповідною якістю, без частих перерв або значних відхилень параметрів. У сучасних умовах зростання навантажень, інтеграції нестабільних джерел і розвитку інтелектуальних мереж, проблема підвищення надійності та якості електроенергії стає особливо актуальною [1–3].

Надійність системи електропостачання визначається як здатність мережі забезпечувати безперервне постачання з допустимими параметрами напруги, частоти тощо. Так, у роботі аналізу систем розподілу зазначено, що на них припадає до 90 % проблем з надійністю через їх складність і безпосередню близькість до споживача [4]. Паралельно з цим, якість електричної енергії стала ключовим компонентом сучасних енергетичних систем: відхилення напруги, гармоніки, частотні коливання, флікер і несиметрія впливають і на працездатність обладнання, і на ресурс мережі [5, 6].

Для підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ» підвищення надійності системи електропостачання є стратегічним завданням. В умовах сучасної економіки перерви у електропостачанні чи значні відхилення параметрів можуть призводити до простоїв, дефектів продукції, збільшення витрат на обслуговування та втрати іміджу. Водночас впровадження системи контролю якості електроенергії в режимі реального часу дозволяє оперативно виявляти і усувати відхилення, що істотно підвищує загальний рівень надійності та стабільності електропостачання [6].

Сьогодні розробка й впровадження таких систем вимагає не лише аналізу показників надійності (наприклад, SAIDI, SAIFI), але й моніторингу якісних показників (THD, флікер, несиметрія, відхилення напруги/частоти) у режимі реального часу з використанням сучасних вимірювальних приладів і систем

автоматизації [2, 6]. Впровадження підходу «в режимі реального часу» забезпечує можливість не просто ретроспективного аналізу, а своєчасного реагування, що у свою чергу зменшує ймовірність аварійних ситуацій та короткочасних перерв [6].

Отже, тема дослідження є актуальною як з точки зору теорії енергетичних систем, так і практично для промислового підприємства, оскільки сполучає вимоги до надійності, якості та сучасних інформаційно-технологічних рішень.

2. Аналіз стану наукової розробки проблеми. Питання забезпечення надійності систем електропостачання та контролю якості електричної енергії є предметом багатьох сучасних досліджень. Надійність системи визначається не лише стійкістю до відмов, а й стабільністю параметрів якості електроенергії, оскільки їх відхилення безпосередньо впливають на працездатність споживачів [7].

У роботі [8] підкреслено, що моніторинг показників якості електроенергії (напруга, частота, коефіцієнт гармонічних спотворень, флікер, несиметрія) має ключове значення для оцінювання надійності розподільчих мереж. Зокрема, зниження стабільності напруги в низьковольтних системах часто є причиною відмов технологічного обладнання.

Системи реального часу дозволяють отримувати інформацію про стан мережі з високою частотою вибірки, що забезпечує не лише аналітичний, а й попереджувальний контроль. У дослідженні [9] наведено огляд сучасних алгоритмів виявлення та класифікації порушень якості електроенергії з використанням методів машинного навчання, які підвищують точність і швидкість реагування. Крім того, дослідники звертають увагу на економічні аспекти – вартість поганої якості електроенергії та ефективність запобіжних заходів [10]. Впровадження систем онлайн-моніторингу дозволяє мінімізувати збитки від відмов, оптимізувати технічне обслуговування та покращити індикатори SAIDI/SAIFI.

Таким чином, сучасні наукові праці свідчать про необхідність комплексного підходу до підвищення надійності систем електропостачання на

основі контролю якості електричної енергії в реальному часі, що й становить основу даного дослідження для умов ПВКП «УКРСТАНДАРТ».

3. Мета дослідження. Метою даної роботи є підвищення надійності системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ» шляхом впровадження системи контролю якості електричної енергії в режимі реального часу.

4. Об'єкт дослідження – система електропостачання підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ», що включає трансформаторну підстанцію, внутрішні розподільчі мережі, силові та освітлювальні навантаження, а також систему контролю параметрів електричної енергії.

5. Предмет дослідження – показники надійності та якості електричної енергії в системі електропостачання підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ», а також методи й технічні засоби контролю цих показників у режимі реального часу.

6. Завдання дослідження. Для досягнення цієї мети передбачається розробити та обґрунтувати технічні й організаційні рішення, що забезпечать безперервність електропостачання, зменшення кількості та тривалості відмов, своєчасне виявлення відхилень параметрів якості електроенергії та їх усунення.

7. Методи дослідження. У роботі застосовано експериментальні та аналітичні методи дослідження, що базуються на вимірюванні параметрів якості електроенергії в режимі реального часу за допомогою сучасних приладів контролю типу РСЕ-РА 8500. Аналіз результатів здійснюється шляхом порівняння виміряних показників із вимогами стандартів ДСТУ EN 50160:2014 та ІЕС 61000-4-30:2015, а також оцінювання впливу відхилень на надійність електропостачання підприємства [3, 5, 7].

8. Структура та обсяг роботи. Дипломна робота складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи становить 59 сторінок машинописного тексту, містить 13 рисунків, 5 таблиць, 38 найменувань у списку використаних джерел.

1. АНАЛІЗ ПРИЧИН ПОГІРШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА СПОСОБІВ ЇЇ ПІДВИЩЕННЯ

1.1. Поняття якості електричної енергії

Якість електричної енергії є комплексною характеристикою, що визначає ступінь відхилення параметрів напруги, струму та частоти від номінальних значень, установлених нормативними документами [11]. Відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, якість електроенергії визначається сукупністю показників, які відображають стабільність електричних параметрів у часі, їх відповідність стандартам і вплив на надійність роботи споживачів [12].

Під високою якістю електроенергії розуміють такі умови, за яких електроприймачі можуть функціонувати без перевантажень, перегрівів, мерехтіння освітлення та хибних спрацювань систем керування. Порушення цих параметрів призводить до зниження енергоефективності, збільшення втрат у мережі, зменшення ресурсу електрообладнання та підвищення аварійності [13]. Особливої уваги набувають спотворення напруги, гармоніки та флікер, що часто виникають через наявність нелінійних споживачів – частотних перетворювачів, випрямлячів, імпульсних джерел живлення та світлодіодних систем освітлення [14].

Основні нормовані показники якості електричної енергії та їх допустимі значення наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Основні показники якості електричної енергії згідно з ДСТУ EN 50160:2014

Показник якості електроенергії	Допустиме значення згідно ДСТУ EN 50160:2014	Фізичний зміст і вплив
Відхилення напруги	$\pm 10\%$ від номінальної	Відображає довготривалі зміни середнього значення напруги, що

		впливають на стабільність роботи обладнання
Коефіцієнт гармонічних спотворень (Total Harmonic Distortion)	$\leq 8 \%$ для напруги	Характеризує рівень впливу гармонік на форму напруги; перевищення призводить до нагріву трансформаторів та двигунів
Частотні відхилення	$\pm 1 \%$	Відображають нестабільність генерації або дисбаланс споживання й виробництва електроенергії
Флікер (короткочасна/довготривала доза)	$P_{st} \leq 1.0$; $P_{lt} \leq 0.8$	Оцінює мерехтіння освітлення, спричинене коливаннями напруги
Асиметрія напруги	$\leq 2 \%$	Відображає нерівномірність фазних напруг, що спричинює додаткові втрати в електродвигунах
Короткочасні перерви	тривалістю до 3 хв	Викликають зупинку чутливого обладнання та втрату даних
Імпульсні перенапруги	не більше 1,5 кВ (у мережах 0,4 кВ)	Зумовлюють пробій ізоляції та пошкодження електронних пристроїв

Системи оцінювання та контролю якості електроенергії базуються на вимірюванні цих параметрів у реальному часі з подальшим аналізом відхилень і прогнозуванням тенденцій. Реєстрація та візуалізація даних за допомогою приладів дає змогу здійснювати безперервний контроль, своєчасно виявляти перевищення нормативів і запобігати аварійним ситуаціям [15]. У межах концепції Smart Grid такі системи інтегруються з базами даних та аналітичними модулями, що забезпечує автоматизоване управління якістю та надійністю електропостачання [16, 17].

Таким чином, якість електричної енергії є ключовим чинником надійності системи електропостачання, а її контроль у режимі реального часу є

ефективним засобом підвищення енергетичної стабільності підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ».

1.2. Відхилення напруги

Відхилення напруги є однією з найпоширеніших форм порушення якості електричної енергії в системах розподілу та споживання. Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, під відхиленням напруги розуміють різницю між середнім діючим значенням фазної або лінійної напруги за визначений інтервал часу та її номінальним значенням, виражену у відсотках [12]. Цей параметр відображає стабільність режиму живлення і безпосередньо залежить від структури та навантаження електричної мережі.

Основними причинами виникнення відхилень напруги є нерівномірність розподілу навантаження, зміна режимів споживання та втрати напруги у лініях через падіння напруги на активних і реактивних опорах [18]. У години максимального навантаження внаслідок збільшення струмів у проводах відбувається помітне зниження напруги, тоді як у періоди мінімального споживання часто фіксується її підвищення. Така ситуація особливо характерна для мереж із низькою пропускною здатністю або неузгодженими перетинами ліній.

Джерелом коливань напруги є також пускові процеси потужних електродвигунів, які спричиняють короткочасне зростання струмів і, відповідно, падіння напруги на ділянках мережі [19]. Подібні ефекти спостерігаються під час роботи зварювальних апаратів, дугових печей, електролізних установок і компресорних станцій, де електричне навантаження змінюється імпульсно.

Суттєвий вплив мають також нелінійні навантаження – випрямлячі, імпульсні блоки живлення, частотні перетворювачі, світлодіодні драйвери тощо. Вони споживають струми з викривленою формою, що викликає нерівномірні коливання напруги у фазах і поява гармонічних складових [20].

У розподільчих мережах із високим рівнем інтеграції відновлюваних джерел енергії (сонячних і вітрових станцій) відхилення напруги можуть виникати внаслідок динамічних змін генерованої потужності, особливо при коливаннях сонячного випромінювання або швидкості вітру. У таких випадках напруга на шинах споживача змінюється не лише в межах добових циклів, а й упродовж секунд [21].

Додатковим чинником є неправильна робота пристроїв регулювання напруги – ступеневих перемикачів обмоток трансформаторів, автоматичних регуляторів напруги, конденсаторних установок. Нескоординована робота цих елементів призводить до чергування підвищених і знижених рівнів напруги або навіть до появи автоколивань у системі [22].

У цілому, сукупність перелічених факторів зумовлює як тривалі відхилення напруги ($\pm 10\%$ від номінальної), так і короткочасні коливання, що створюють додаткові проблеми для стабільності живлення та подальшої компенсації реактивної потужності [23]. Таким чином, відхилення напруги мають багатфакторну природу, яка поєднує вплив електричних, технологічних та погодних чинників і потребує постійного моніторингу для своєчасного виявлення причин їх виникнення.

1.3. Коливання напруги

Коливання напруги – це періодичні або неперіодичні зміни діючого значення напруги, що відбуваються у часі відносно її середнього рівня. Відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, такі коливання виникають у результаті швидких змін навантаження або коливань генерованої потужності, які спричиняють короткочасні відхилення від номінального значення [12].

Основною причиною коливань напруги є варіація споживаного струму внаслідок змін навантаження, особливо під час пуску чи зупинки потужних електроприймачів. Найбільш інтенсивні коливання спостерігаються у системах з великими індукційними двигунами, зварювальними агрегатами,

дробильними установками, компресорами та кранами, де споживана потужність змінюється стрибкоподібно [18, 19]. Такі коливання мають коротку тривалість (до кількох секунд) і призводять до швидких змін напруги на шинах споживачів.

У промислових електромережах джерелом коливань напруги є також електродугові печі, які характеризуються хаотично змінними струмами дуги. Під час їх роботи напруга може коливатися десятки разів на секунду, створюючи нестаціонарні процеси у мережі живлення [24]. Подібні ефекти спостерігаються й при експлуатації зварювальних постів з нерівномірним навантаженням, а також установок плазмового різання, де коливання струму дуги викликають часті зміни напруги.

Значний вплив на стабільність напруги мають динамічні навантаження перетворювальної техніки, зокрема тиристорні випрямлячі, інвертори, частотні регулятори, які постійно змінюють споживану потужність у залежності від технологічного процесу. Унаслідок імпульсного споживання струму напруга на шинах джерела живлення змінюється, утворюючи пульсації, що сприймаються як коливання [20, 25].

Колівання напруги можуть бути спричинені також флуктуаціями генерації у системах з відновлюваними джерелами енергії. У фотоелектричних установках такі зміни зумовлені проходженням хмарності або різким зниженням освітленості, що викликає швидку зміну вироблюваної потужності. У вітрових електростанціях нестабільність швидкості вітру призводить до аналогічних коливань активної потужності й відповідно напруги [21, 26].

У розподільчих мережах додатковим чинником є взаємодія між навантаженням та компенсаційними пристроями. Некоректно налаштовані регулятори напруги або автоматичні перемикачі обмоток трансформаторів (РПН) можуть створювати автоколивання напруги з періодом у кілька секунд, особливо у разі наявності затримки зворотного зв'язку [22].

Крім того, у системах із великою кількістю нелінійних і змінних споживачів можуть виникати резонансні явища між індуктивними елементами мережі та конденсаторними батареями компенсації реактивної потужності. Такі резонанси призводять до періодичних коливань напруги навіть без істотних змін активного навантаження [27].

Отже, коливання напруги є наслідком складної взаємодії динамічних, нелінійних і стохастичних процесів у системі електропостачання. Їхні основні причини – це нестационарність електричних навантажень, робота дугових і тиристорних пристроїв, зміни генерації у відновлюваних джерелах енергії, а також некоректна робота автоматичних регуляторів напруги та компенсаційних пристроїв.

1.4. Несинусоїдні режими роботи

Несинусоїдні режими роботи електричних мереж виникають у разі спотворення форми кривих напруги або струму, коли вони відхиляються від ідеальної синусоїди (рис. 1.1). Такі режими є результатом появи гармонічних складових у струмах і напругах, частоти яких кратні основній частоті мережі (50 Гц). Відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, наявність гармонік у напрузі або струмі свідчить про відхилення від нормальних умов роботи, що пов'язане з нелінійними процесами у навантаженні або в елементах енергосистеми [12].

На рисунку 1.1 показано приклад несинусоїдного режиму, коли до основної гармоніки додаються вищі гармоніки (3-я та 5-та), що змінюють форму сигналу. Такі спотворення характерні для роботи випрямлячів, тиристорних перетворювачів і електронних блоків живлення [28, 29].

Головною причиною виникнення несинусоїдності є робота нелінійних електроприймачів, у яких миттєве значення струму не пропорційне прикладеній напрузі. До таких пристроїв належать випрямлячі, інвертори, імпульсні блоки живлення, перетворювачі частоти, зварювальні апарати, комп'ютерна техніка, світлодіодне освітлення та електронні зарядні пристрої

[20, 25]. Вони споживають струм у вигляді коротких імпульсів, формуючи у спектрі значну кількість непарних гармонік – переважно третьої, п'ятої та сьомої.

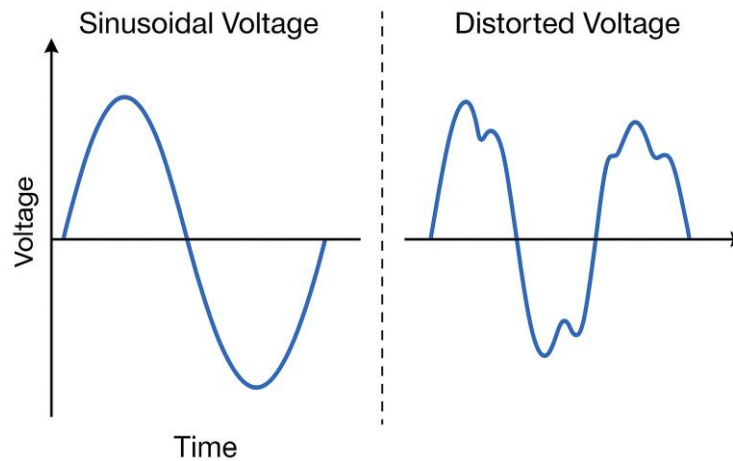


Рис. 1.1 – Порівняння синусоїдної та спотвореної (несинусоїдної) форми напруги

У промислових мережах значним джерелом спотворень є тиристорні й транзисторні перетворювачі потужності, що застосовуються у системах регулювання електроприводів, плавного пуску двигунів і стабілізації напруги. Перемикання силових елементів цих пристроїв створює імпульсні перешкоди, які поширюються по мережі у вигляді високочастотних гармонічних хвиль [28].

Ще одним чинником є електродугові установки – зварювальні агрегати, дугові печі та плазмові різальні комплекси, у яких струм дуги змінюється нерівномірно. Це створює складний спектр гармонік до 40-ї порядкової, а також міжгармонічні складові, що зумовлюють нестаціонарні режими напруги в розподільчих ланцюгах [24], [29].

Несинусоїдність може виникати і внаслідок резонансних явищ між індуктивними й ємнісними елементами мережі, особливо під час застосування батарей конденсаторів для компенсації реактивної потужності. Резонанс у

ланцюзі живлення призводить до локального підсилення гармонічних струмів певного порядку, що різко збільшує рівень спотворення напруги [27], [30].

Додатково джерелом несинусоїдності можуть бути електронні пристрої керування у системах Smart Grid, обладнаних модуляторами широтно-імпульсного керування (ШІМ). Такі пристрої працюють на високих частотах комутації (кіло-герцовий діапазон), створюючи спектр високочастотних гармонік, які накладаються на основну частоту мережі [31].

Несинусоїдні режими характерні також для мереж із розосередженою генерацією, де інвертори фотоелектричних і вітрових установок перетворюють постійний струм у змінний. При недостатньому фільтруванні інверторні модулі генерують гармоніки й міжгармоніки, що змінюють форму кривої напруги та створюють електромагнітні перешкоди [26, 32].

Таким чином, несинусоїдні режими роботи виникають унаслідок дії різних джерел – нелінійних, імпульсних, перетворювальних і дугових навантажень, а також через резонансні процеси у мережі. Вони є невід’ємною характеристикою сучасних електричних систем з великою кількістю електронних пристроїв і відновлюваних джерел енергії, що потребує постійного моніторингу спектрального складу напруги та струму.

1.5. Несиметрія в системах електропостачання

Несиметрія (або небаланс фаз) у трьохфазних системах електропостачання означає, що значення фазних напруг або струмів не відповідають одна одній за амплітудою або зсувом фаз (рис. 1.2). Це призводить до появи складових негативної та нульової послідовностей, що відображає порушення ідеального балансу трьох фаз [12, [8].

Основна причина такого небалансу – нерівномірний розподіл навантаження між фазами. У сучасних мережах, особливо в розподільчому рівні, все більше підключаються однофазні споживачі (наприклад, побутові прилади, зарядні станції для електромобілів, світлодіодне освітлення), і якщо

вони подані на різні фази нерівномірно, виникає дисбаланс напруги або струму [18, 22].

Додатковими причинами є конструктивні або експлуатаційні особливості мережі: різні параметри обмоток трансформаторів (несиметрія в трансформаторі), незбалансовані провідники, слабка транспозиція ліній, нерівномірне заземлення або підключення батарей конденсаторів компенсації реактивної потужності [20].

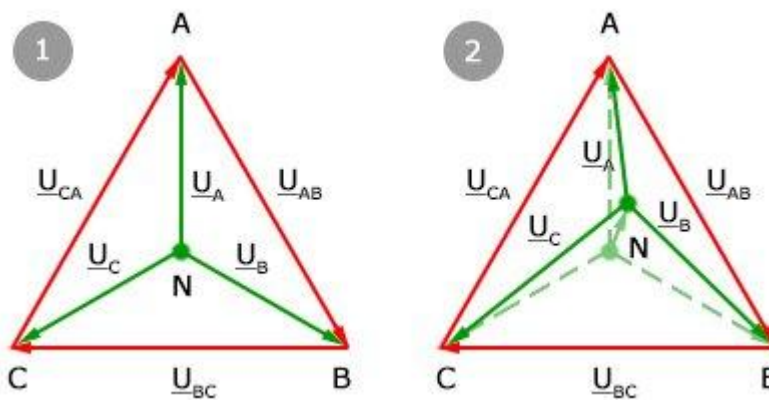


Рис. 1.2 – Несиметрія напруг (перекіс фаз) в трифазній системі

У сучасних умовах також суттєвим джерелом є інтеграція розподілених джерел енергії (Джерел – DER) та однофазних генераторів – їх підключення може призводити до фазового дисбалансу, особливо за відсутності коректної фази або коли навантаження і генерація на фазах розподілені нерівномірно [4, 14]. Нарешті, проміжними факторами можуть бути короточасні несправності мережі, неправильна робота автоматичних перемикачів фазового регулювання або перепідключення фазових ліній – усе це підтримує ефект несиметрії [7].

Таким чином, несинермія в системах електропостачання є багатофакторним явищем, що охоплює технічні, конструкційні, навантажувальні та генераційні причини. Розуміння саме причин її виникнення є критичним при впровадженні систем моніторингу і управління, а також у розробці заходів щодо мінімізації цього дисбалансу в системі підприємства.

1.6. Вплив відхилення показників якості електричної енергії на роботу технологічного обладнання

Відхилення показників якості електричної енергії (ЯЕЕ) безпосередньо впливають на стабільність та довговічність роботи технологічного обладнання промислових підприємств. Згідно з ДСТУ EN 50160:2014, параметри напруги, частоти та симетрії мають залишатися в межах установлених норм, а перевищення допустимих відхилень призводить до передчасного старіння, збоїв або виходу з ладу електроприймачів [12].

Узагальнені дані щодо впливу відхилень показників якості електричної енергії на роботу технологічного обладнання наведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 -

№	Показник якості електричної енергії	Основні причини виникнення	Характер впливу на обладнання
1	Відхилення напруги від номінальної	Зміна навантаження в мережі, втрати напруги у лініях, неправильна робота регуляторів напруги	Перегрів електродвигунів при зниженні U; прискорене старіння ізоляції при підвищенні U; зниження продуктивності машин
2	Коливання напруги (флікери)	Імпульсні зміни навантаження (зварювальні апарати, дугові печі, компресори), нестабільна генерація ВДЕ	Мерехтіння освітлення, коливання крутного моменту, зупинки ліній, зниження точності вимірювань
3	Гармонічні спотворення (несинусоїдність)	Робота нелінійних навантажень – випрямлячів, інверторів, імпульсних блоків живлення, резонансні процеси в мережі	Перегрів трансформаторів і кабелів, резонанси, хибні спрацювання автоматики, електромагнітні завади
4	Несиметрія напруги і струмів	Нерівномірний розподіл однофазних навантажень, несиметрія ліній, неправильне заземлення або компенсація	Перегрів двигунів через появу зворотної послідовності, вібрації, зниження ресурсу приводу
5	Короткочасні просідання та перерви напруги	Пуск потужних двигунів, короткі замикання, спрацювання захисту, перемикання ліній	Зупинки технологічних процесів, перезавантаження контролерів, збої у системах автоматизації
6	Відхилення частоти	Нерівновага між генерацією і споживанням,	Зміна швидкості обертання двигунів, розсинхронізація

		аварійні режими або перевантаження генераторів	механізмів, порушення технологічних циклів
--	--	--	--

Одним із найпоширеніших негативних чинників є відхилення напруги від номінального рівня. Зниження напруги призводить до збільшення струму в обмотках електродвигунів, що викликає перегрів, зменшення пускового моменту та падіння продуктивності технологічних машин [19, 23]. Підвищення напруги, навпаки, збільшує втрати на намагнічування трансформаторів і сприяє прискореному старінню ізоляції, особливо у приводах і печах із резистивним або індукційним навантаженням [20].

Гармонічні спотворення у системі живлення спричиняють додаткові теплові втрати у трансформаторах, двигунах і кабелях, підвищують рівень електромагнітних завад і можуть спричинити хибні спрацювання електронних контролерів [28, 30, 32]. При значних рівнях загального коефіцієнта гармонічних спотворень ($\text{THD} > 8\%$) у мережах живлення перетворювальних пристроїв спостерігається нестабільність керування та резонансні явища в компенсувальних установках, що призводить до зростання втрат потужності [25, 27].

Коливання напруги та флікери, зумовлені частими змінами навантаження (зварювальні апарати, дугові печі, компресори), викликають вібрації у приводах, мерехтіння освітлення, порушення точності вимірювальних систем і деградацію чутливого обладнання [24, 26]. Особливо небезпечними є короточасні просідання напруги, що викликають зупинки автоматизованих ліній і перезавантаження контролерів керування технологічними процесами [23].

Несиметрія напруги негативно впливає на трифазні електродвигуни – поява складових зворотної послідовності створює зустрічне магнітне поле, що збільшує струми в обмотках і знижує крутний момент. Це призводить до перегріву, вібрацій та зниження терміну служби механічної частини електропривода [18], [22]. У системах з великою кількістю однофазних

споживачів несиметрія може досягати 2–3 %, що вже спричиняє помітне зниження ефективності виробничого обладнання [21].

Частотні відхилення у промислових мережах, особливо за умов аварійних режимів або неузгодженості генерувальних потужностей, викликають зміни швидкості обертання електродвигунів і розсинхронізацію приводів. Це особливо небезпечно для агрегатів з жорсткими кінематичними зв'язками – конвеєрів, насосів, компресорів [19].

У сукупності порушення показників якості електроенергії знижують енергетичну ефективність, надійність технологічних процесів і експлуатаційний ресурс обладнання. Тому одним із пріоритетних напрямів підвищення надійності систем електропостачання є впровадження систем онлайн-моніторингу параметрів ЯЕЕ у реальному часі, що дозволяє своєчасно виявляти аномалії та запобігати пошкодженням [23, 31].

1.7. Аналіз засобів та способів підвищення якості електроенергії

Підвищення якості електричної енергії є одним із ключових напрямів забезпечення надійності систем електропостачання промислових підприємств. Згідно з положеннями ДСТУ EN 50160:2014, стабільність напруги, частоти та симетрії повинна підтримуватись у визначених межах, що досягається застосуванням комплексу технічних і організаційних заходів (рис. 1.3) [12].

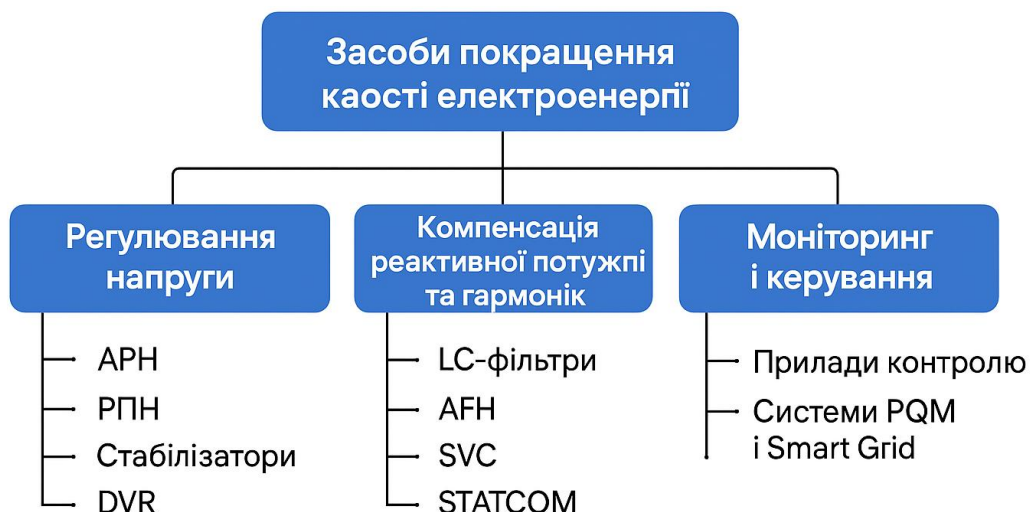


Рис. 1.3 – Класифікація способів підвищення якості електроенергії

Основу технічних засобів становлять пристрої, які дозволяють регулювати, компенсувати або фільтрувати параметри електроенергії. До таких належать автоматичні регулятори напруги (АРН) та підстанційні регулятори з пристроями РПН (регулювання під навантаженням), що забезпечують підтримання напруги в заданих межах при зміні режимів навантаження [19]. Для стабілізації рівня напруги в локальних мережах використовуються динамічні компенсатори напруги (DVR), які за доли секунди відновлюють напругу після короткочасного провалу [23].

Для зменшення гармонічних спотворень у мережах з нелінійними навантаженнями застосовуються пасивні LC-фільтри, активні фільтри гармонік (AFH) та гібридні системи компенсації. Пасивні фільтри налаштовуються на певні частоти гармонік і забезпечують їх відведення, тоді як активні фільтри генерують протифазний сигнал, компенсуючи спотворення в реальному часі [27, 28], 30]. У системах із великою кількістю перетворювальних пристроїв застосування таких фільтрів дозволяє знизити коефіцієнт THD у 2–3 рази.

Важливим напрямом є компенсація реактивної потужності, що дозволяє зменшити струмові навантаження в мережі, втрати потужності й покращити рівень напруги. Найпоширенішими засобами є автоматичні конденсаторні установки (АКУ), синхронні компенсатори, а також статичні вар-компенсатори (SVC) і статичні синхронні компенсатори (STATCOM). Останні належать до високошвидкісних електронних пристроїв на основі силових перетворювачів і дозволяють регулювати реактивну потужність у широкому діапазоні з часом відгуку менш ніж 50 мс [25, 27].

Для зниження несиметрії напруги ефективним є балансування фазних навантажень за допомогою автоматичних систем контролю розподілу навантаження. Такі системи відстежують значення струмів у фазах і здійснюють комутацію споживачів між фазами у режимі онлайн, що дозволяє зменшити коефіцієнт несиметрії з 3–4 % до нормативного рівня (до 2 %) [18], [21].

З метою усунення коливань напруги та провалів застосовуються реле контролю напруги, динамічні стабілізатори (DVR) та джерела безперебійного живлення (UPS), які забезпечують підтримання номінального рівня напруги при короткочасних порушеннях у мережі. Для чутливих споживачів, таких як системи керування або лабораторне обладнання, UPS дозволяють забезпечити безперервність живлення навіть при повній втраті напруги на вході протягом кількох секунд або хвилин [23].

Серед організаційних заходів важливе місце займає моніторинг і діагностика параметрів якості електроенергії. Сучасні системи збору та аналізу даних дозволяють у реальному часі контролювати параметри PQ, прогнозувати відхилення й формувати автоматизовані звіти [16, 31].

Застосування таких систем на підприємствах типу ПВКП «УКРСТАНДАРТ» забезпечить не лише технічний контроль, а й економічну оптимізацію режимів енергоспоживання.

1.8. Висновки до розділу

У розділі проведено аналіз основних причин погіршення показників якості електричної енергії, їх впливу на роботу технологічного обладнання та розглянуто сучасні технічні засоби для підвищення якості електропостачання. Встановлено, що стан електроенергетичних систем значною мірою визначається стабільністю напруги, частоти, симетрії та рівнем гармонічних спотворень, регламентованих стандартом ДСТУ EN 50160:2014.

Основними факторами погіршення якості електроенергії є нерівномірність навантаження по фазах, робота нелінійних споживачів, пускові процеси потужних електродвигунів, а також коливання генерованої потужності у відновлюваних джерелах енергії. Ці фактори призводять до відхилення напруги, появи гармонічних складових, флікерів і несиметрії, що в сукупності знижує надійність роботи електроприймачів, збільшує втрати потужності та скорочує ресурс технологічного обладнання.

Проаналізовано основні методи покращення показників якості електроенергії, серед яких найбільш ефективними є використання активних фільтрів гармонік, автоматичних регуляторів напруги, систем компенсації реактивної потужності (SVC, STATCOM), а також засобів контролю балансу фазних навантажень. Однак стабільність параметрів електроенергії в сучасних промислових умовах не може бути забезпечена лише технічними заходами – необхідним є постійний моніторинг параметрів якості електроенергії у режимі реального часу, що дозволяє своєчасно виявляти аномалії, аналізувати тенденції та запобігати порушенням у роботі системи.

Отже, підвищення надійності системи електропостачання підприємства повинно базуватися на комплексному підході, який поєднує технічні засоби регулювання та компенсації з впровадженням інтелектуальної системи моніторингу якості електроенергії. Це забезпечить стабільну роботу обладнання, зменшить втрати енергії та створить основу для подальшої оптимізації режимів електроспоживання на підприємстві ПВКП «УКРСТАНДАРТ».

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПІДПРИЄМСТВІ ПВКП «УКРСТАНДАРТ»

2.1. Методика проведення досліджень

Метою проведення експериментальних досліджень є оцінювання фактичних показників якості електричної енергії (ЯЕЕ) у системі електропостачання підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ» та визначення їх відповідності вимогам ДСТУ EN 50160:2014 і міжнародних стандартів ІЕС 61000-4-30:2015. Результати вимірювань використовуються для подальшого обґрунтування необхідності впровадження системи моніторингу параметрів ЯЕЕ у режимі реального часу.

Дослідження виконувалися відповідно до вимог ІЕС 61000-4-7:2009 (визначення гармонічних складових) та ІЕС 61000-4-15:2010 (оцінювання флікерів). Об'єктом спостереження є внутрішня система електропостачання підприємства напругою 0,4 кВ, що живиться від двох трансформаторних підстанцій ТП-1 та ТП-2 типу КТП-250/10/0,4.

Основні параметри, що підлягали вимірюванню:

- діюче значення фазної та лінійної напруги;
- частота мережі;
- коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) для фаз А, В, С;
- миттєві відхилення та коливання напруги;
- флікер короткочасний (Pst) і тривалий (Plt);
- коефіцієнти несиметрії напруги;
- тривалі та короткочасні провали напруги.

Вимірювання проводилися із застосуванням портативного аналізатора якості електроенергії з функцією захисту типу PSE-PA 8500 (рис. 2.1), здатного фіксувати параметри PQ згідно з класом точності А за стандартом ІЕС 61000-4-30. Дані з приладу зчитувалися у програмному забезпеченні PowerGraph.



Рис. 3.1 – Портативний аналізатор якості електроенергії з функцією захисту типу PCE-PA 8500

Режими вимірювання обиралися таким чином, щоб охопити різні періоди роботи підприємства – денний (пікове навантаження), вечірній (зменшене навантаження) та нічний (мінімальне споживання). Під час спостережень фіксувалися також зміни в роботі основних споживачів – компресорних агрегатів, зварювального устаткування, систем освітлення, що є потенційними джерелами гармонічних і флікерних спотворень.

Для визначення відхилень від нормативних меж усі результати вимірювань порівнювалися з допустимими значеннями, встановленими у таблицях 1 і 2 стандарту ДСТУ EN 50160:2014, а також із даними національних методичних рекомендацій з оцінювання якості електричної енергії [12].

Отримані результати були використані для побудови графіків добових змін напруги, частоти, гармонічних складових та флікерів, а також для розрахунку інтегральних показників якості електроенергії, що характеризують технічний стан системи електропостачання підприємства.

Результатом методики є створення достовірної бази вимірювальних даних, на основі якої виконано подальший аналіз відхилень параметрів ЯЕЕ та визначено ефективність впровадження системи онлайн-моніторингу.

2.2. Аналіз результатів вимірювань показників якості електроенергії

2.2.1. Відхилення частоти мережі

Результати вимірювання частоти електричної енергії в системі електропостачання підприємства ПМКП «УКРСТАНДАРТ» наведено на рисунках 2.2 і 2.3.

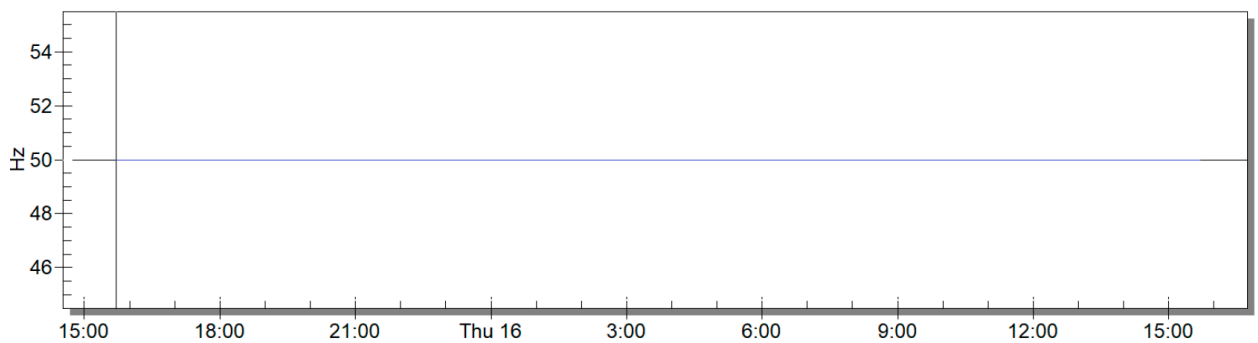


Рис. 2.2 – Зміна частоти мережі на ТП-1 (15-16.01.2025 р.)

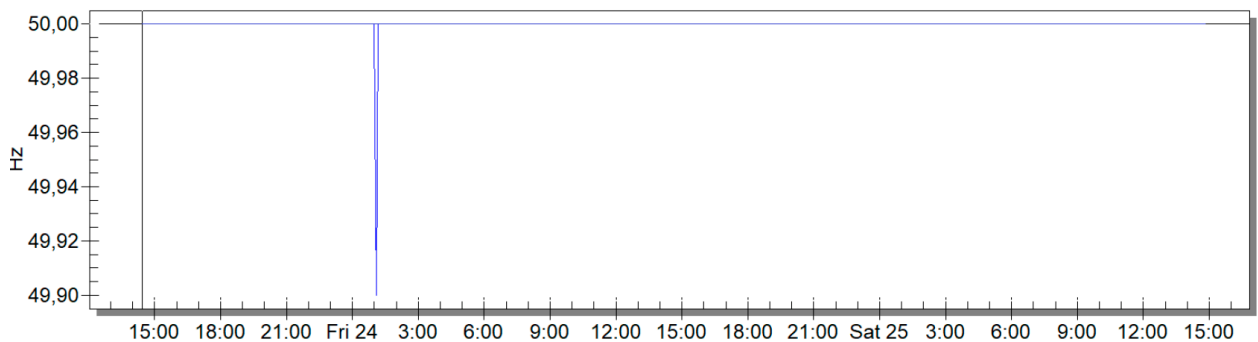


Рис. 2.3 – Зміна частоти мережі на ТП-2 (23-25.01.2025 р.)

Аналіз отриманих даних показує, що упродовж усього періоду спостереження (72 години) частота електричної енергії в мережі підприємства залишалася стабільною та близькою до номінального значення 50 Гц. На діаграмі для ТП-1 лінія частоти практично горизонтальна, що свідчить про відсутність коливань протягом добового циклу. Зафіксоване середнє значення частоти становило 50,00 Гц, мінімальне – 49,98 Гц, максимальне – 50,01 Гц, що цілком відповідає допустимим відхиленням, встановленим стандартом

ДСТУ EN 50160:2014 ($\pm 1\%$ від номінального значення, тобто в межах 49,5–50,5 Гц) [12].

На графіку для ТП-2 зафіксовано одне короточасне відхилення частоти до рівня 49,90 Гц у нічний період (близько 03:00 год), після чого параметр швидко відновився до номінального значення. Подібне відхилення є типовим для моментів зміни навантаження у міжпікові години та не має істотного впливу на роботу технологічного обладнання.

У цілому отримані результати свідчать, що частота живильної мережі підприємства підтримується на стабільному рівні, відхилення не перевищують меж, визначених стандартом, а регулювальні властивості джерела живлення (електричної підстанції) відповідають вимогам до якісного електропостачання промислових споживачів [12].

Таким чином, за результатами досліджень можна зробити висновок, що частотна стабільність системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ» є задовільною, а подальший аналіз має бути зосереджений на виявленні можливих відхилень напруги, гармонічних спотворень та несиметрії, які більш суттєво впливають на роботу технологічних споживачів.

2.2.2. Відхилення напруги

Результати вимірювання фазних напруг у трифазній системі електропостачання підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ» наведено на рисунках 2.4 і 2.5.

Аналіз графіків показує, що на обох трансформаторних підстанціях напруга залишається у межах нормативних значень, передбачених ДСТУ EN 50160:2014, де допускається відхилення від номінальної напруги $230\text{ В} \pm 10\%$, тобто в межах 207–253 В [12].

Для ТП-1 спостерігаються незначні коливання у діапазоні 222–230 В, при цьому середні значення для фаз становили (рис. 2.4):

- фаза А – 226,9 В,

- фаза В – 227,3 В,
- фаза С – 225,8 В.

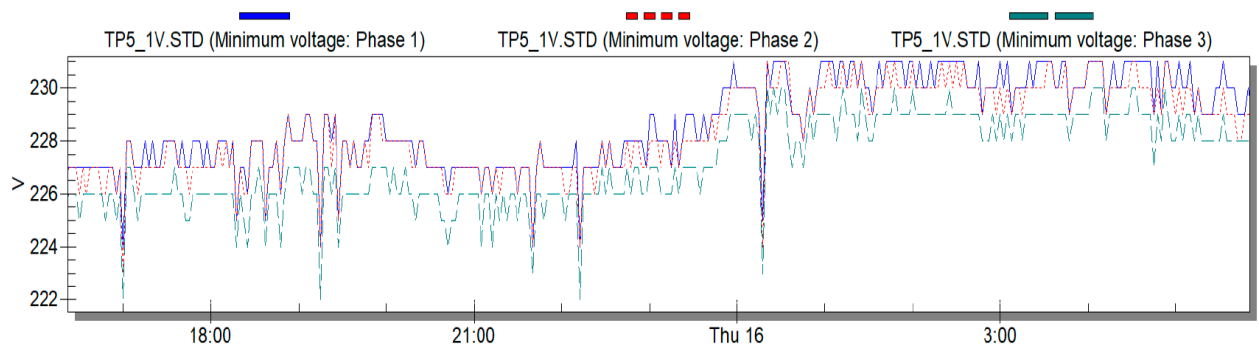


Рис. 2.4 – Зміна фазних напруг на ТП-1 (15-16.01.2025 р.)

Періодичні просідання напруги до 222 В мають короткочасний характер і пов'язані, імовірно, із пуском електродвигунів або роботою зварювальних установок, що підтверджує наявність коротких імпульсних коливань [19, 23].

Для ТП-2 рівень фазної напруги є більш стабільним (рис. 2.5).

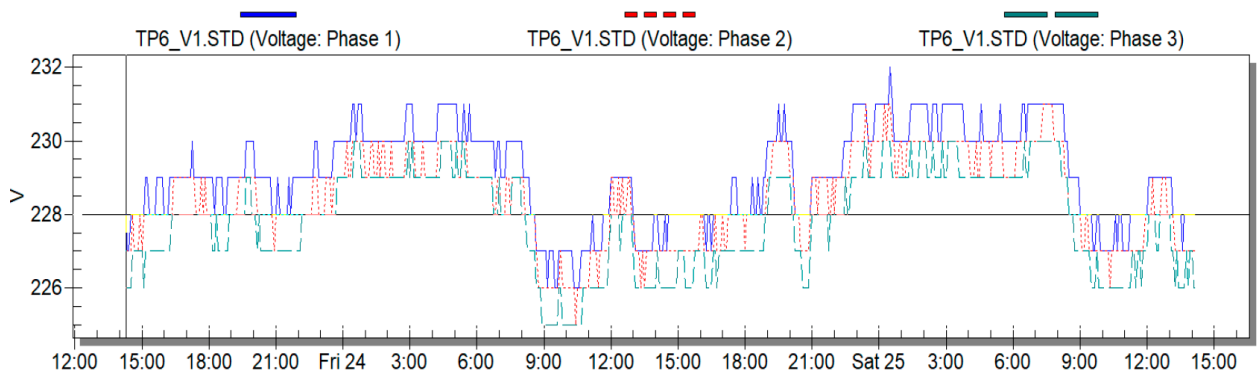


Рис. 2.5 – Зміна фазних напруг на ТП-2 (23-25.01.2025 р.)

Значення коливаються у межах 226–232 В, що свідчить про краще балансування навантаження по фазах. У денний період спостерігається невелике підвищення напруги до 231–232 В, характерне для режимів зниженого навантаження. Мінімальні коливання у нічні години не перевищують 2 В, що знаходиться в межах технічної похибки вимірювального приладу [20, 23].

Порівняльний аналіз двох підстанцій свідчить, що рівень напруги на ТП-2 є більш рівномірним, тоді як на ТП-1 простежуються короточасні падіння, імовірно спричинені локальними пусковими струмами. При цьому коефіцієнт несиметрії напруги не перевищує допустимих значень (до 2 %), що відповідає вимогам [18, 22].

У цілому за результатами вимірювань можна зробити висновок, що показники напруги системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ» відповідають нормативним вимогам, а незначні коливання не мають критичного впливу на роботу технологічного обладнання. Подальший аналіз доцільно спрямувати на виявлення гармонічних спотворень і флікерів, які більшою мірою впливають на якість електроенергії у промислових мережах.

2.2.3. Несинусоїдність напруги

Результати вимірювання рівня несинусоїдності напруги у мережі підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ» подано на рисунках 2.6 та 2.7. Коефіцієнт гармонічних спотворень (THD) характеризує відхилення форми напруги від ідеальної синусоїди та визначається як відношення квадратного кореня із суми квадратів напруг вищих гармонік до напруги основної гармоніки [28, 30]. Відповідно до ДСТУ EN 50160:2014, граничне допустиме значення THD для напруги у низьковольтних мережах становить 8 %.

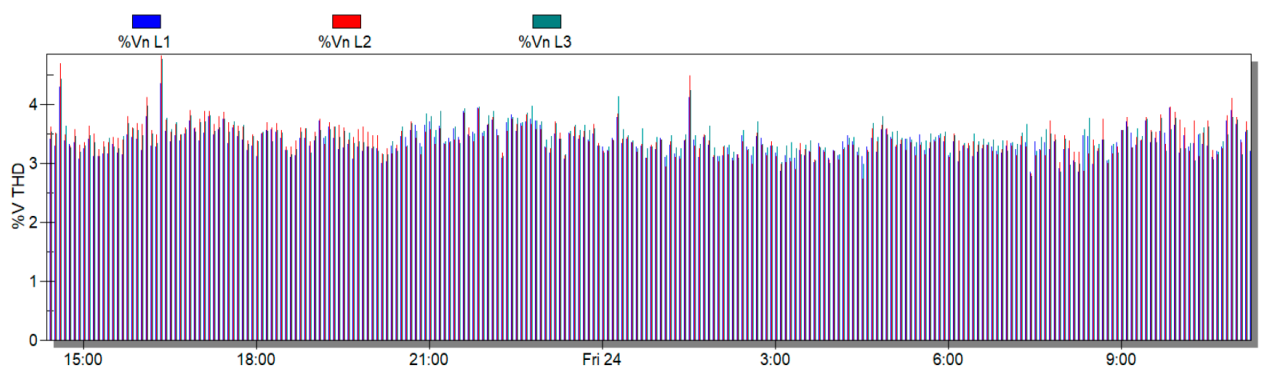


Рисунок 2.6 – Зміна коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) на ТП-1 (15-16.01.2025 р.)

Аналіз результатів показує, що на ТП-1 (рис 2.6) середній рівень гармонічних спотворень протягом добового циклу становить 3,2–3,8 %, при цьому короточасні пікові значення не перевищують 4,2 %. Найбільші сплески спостерігаються у вечірні години (близько 14:00–16:00), що відповідає часу найбільшого навантаження мережі. В інші періоди доби значення залишаються стабільними та нижчими від граничних, отже форма напруги практично синусоїдна [27, 28].

Для ТП-2 рівень гармонічних спотворень є ще нижчим: середні значення знаходяться у межах 2,5–3,3 % (рис. 2.7), а максимальні піки не перевищують 3,6 %. Відносна стабільність показників пояснюється більш рівномірним розподілом навантаження між фазами та меншою часткою нелінійних споживачів у мережі [20, 23].

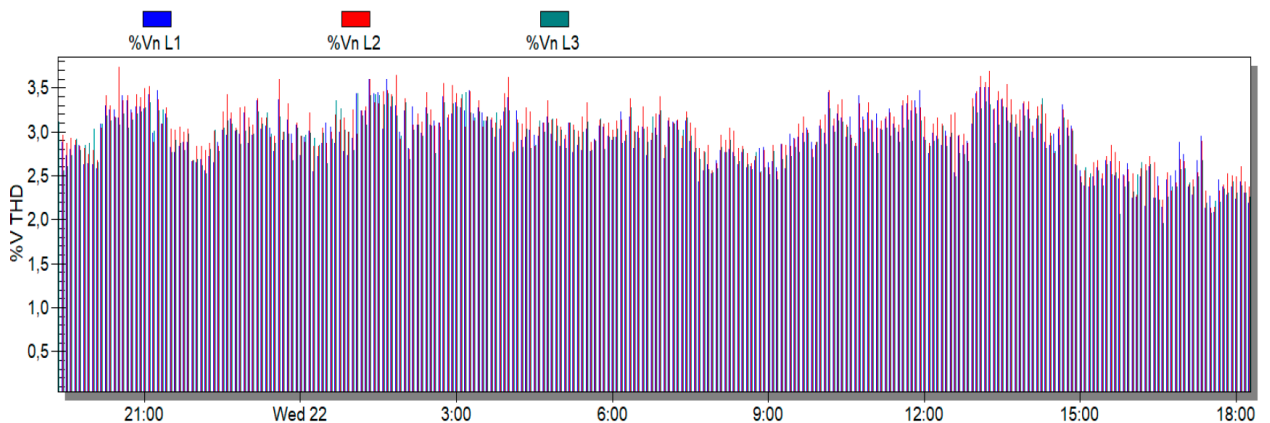


Рисунок 2.7 – Зміна коефіцієнта гармонічних спотворень (THD) на ТП-2 (23-25.01.2025 р.)

Отже, в обох випадках рівень THD суттєво нижчий за нормативну межу 8 %, що свідчить про задовільну якість напруги та відсутність значного впливу нелінійних навантажень. Разом із тим, фіксація періодичних пікових зростань в окремі години доби вказує на доцільність подальшого впровадження системи моніторингу якості електроенергії в режимі реального часу, яка дозволить оперативно виявляти моменти збільшення рівня гармонік і своєчасно вживати коригувальних заходів [16, 31].

2.2.4. Спектральний аналіз гармонічних складових напруги

Для більш глибокої оцінки характеру несинусоїдності виконано спектральний аналіз напруги на базі результатів вимірювань гармонічних складових до 50-ї гармоніки. Графічні результати подано на рисунках 2.8 і 2.9.

З аналізу діаграм видно, що форма напруги суттєво відхиляється від синусоїдальної, а рівень окремих гармонічних складових перевищує допустимі межі, встановлені стандартом ДСТУ EN 50160:2014, згідно з яким граничне значення для окремих гармонік не повинно перевищувати 6 % для 5-ї та 5 % для 7-ї [12, 27].

Для ТП-1 зафіксовано (рис. 2.8), що амплітуда 5-ї гармоніки становить 3,8–4,2 %, а 7-ї – близько 1,5–2 %, що загалом утримується в межах норми. Проте у вечірні години спостерігаються короткочасні піки 5-ї гармоніки до 6,5 %. Це свідчить про перевантаження мережі нелінійними споживачами – переважно зварювальними апаратами, перетворювачами частоти та імпульсними джерелами живлення.

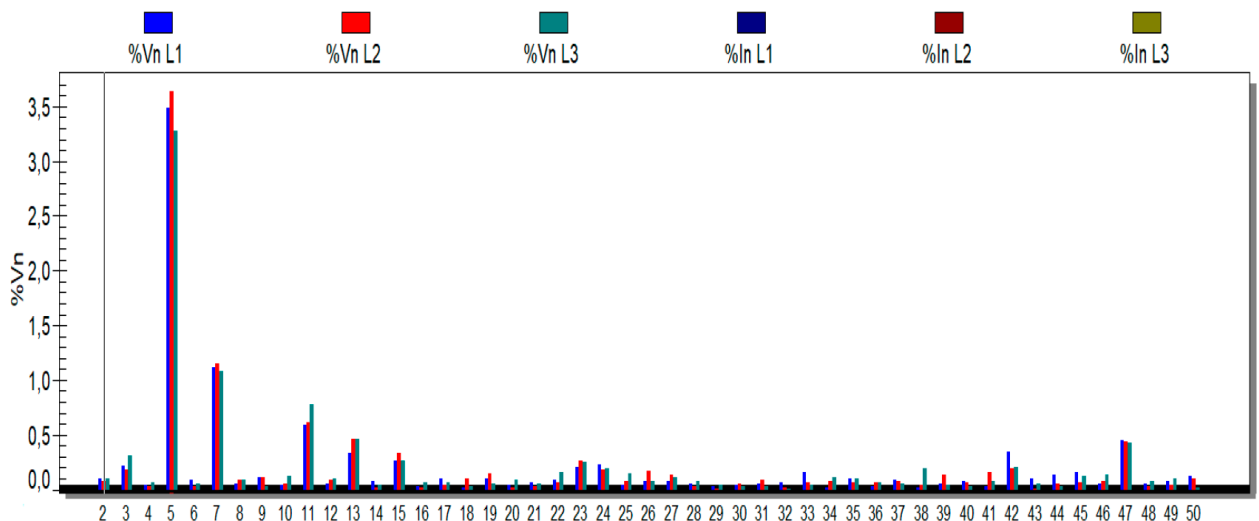


Рис. 2.8 – Спектр гармонічних складових напруги на ТП-1 (15.01.2025 р.)

Для ТП-2 загальний спектр має менші значення (рис. 2.9), однак фіксуються аномальні піки на 23-й та 25-й гармоніках із амплітудою до 1,0–1,2 %, що не є типовим для симетричних навантажень і може бути пов'язане з

роботою тиристорних випрямлячів або частотних перетворювачів на технологічному обладнанні [20, 30].

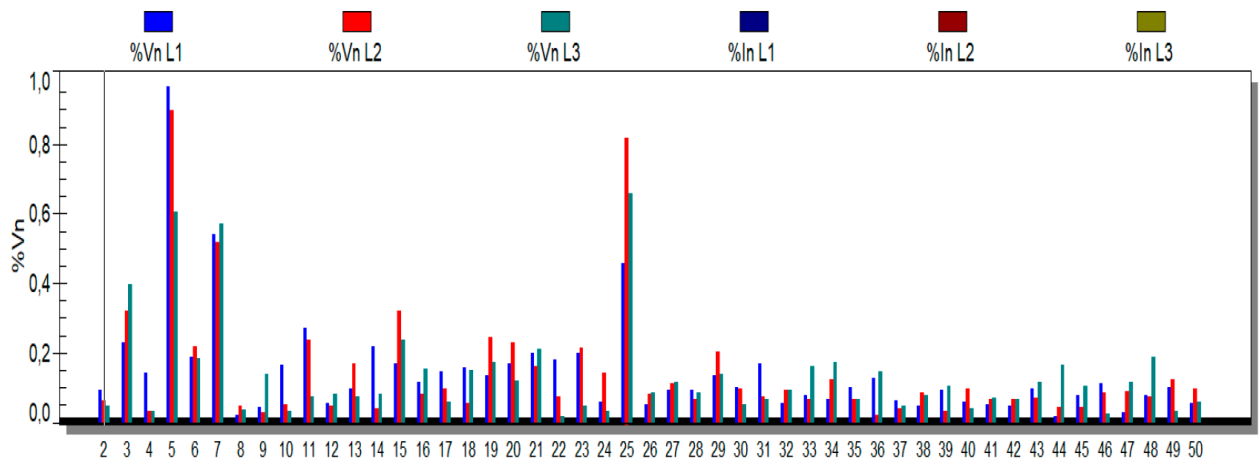


Рис. 2.9 – Спектр гармонічних складових напруги на ТП-2 (23.01.2025 р.)

Отримані результати свідчать, що обидві підстанції мають ознаки підвищеної гармонічної складової. Такі умови можуть призводити до:

- додаткових втрат потужності у трансформаторах;
- нагрівання обмоток електродвигунів;
- збоїв у роботі контрольно-вимірювальних систем;
- передчасного старіння ізоляції кабелів.

Таким чином, результати спектрального аналізу підтверджують необхідність розроблення технічних заходів для зниження рівня гармонічних спотворень – зокрема, встановлення активних фільтрів гармонік, вирівнювання фазних навантажень і впровадження системи моніторингу показників якості електроенергії у режимі реального часу [16, 31].

2.3. Висновки до розділу

У розділі проведено експериментальні дослідження показників якості електричної енергії у системі електропостачання підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ», що дало змогу комплексно оцінити технічний стан мереж та визначити чинники, які впливають на їхню надійність.

Результати вимірювань частоти показали, що впродовж усього періоду моніторингу частота електроенергії утримувалася в межах 49,98–50,01 Гц, тобто повністю відповідала вимогам ДСТУ EN 50160:2014 і не мала негативного впливу на роботу обладнання. Таким чином, частотна стабільність системи електропостачання є задовільною.

Аналіз фазних напруг показав, що у більшості випадків їх рівень відповідає допустимим межам $230 \text{ В} \pm 10 \%$, проте на ТП-1 спостерігаються короточасні відхилення до 222 В, які можуть бути спричинені пусковими процесами потужних електродвигунів. Загальний коефіцієнт несиметрії не перевищує 2 %, однак на окремих ділянках мережі простежуються короточасні перекоси фаз, що знижує ефективність живлення споживачів.

Найсуттєвіші відхилення виявлено під час аналізу гармонічних складових напруги. Для обох підстанцій зафіксовано перевищення амплітуд 5-ї, 7-ї, 20-ї, 23-ї та 25-ї гармонік. Найбільші перевищення спостерігалися на ТП-1 у вечірні години, що вказує на дію нелінійних споживачів – зварювальних апаратів, частотних перетворювачів та імпульсних джерел живлення. Це свідчить про наявність постійного гармонічного навантаження, яке погіршує електромагнітну сумісність і прискорює старіння обладнання.

Загалом, результати вимірювань засвідчили, що система електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ» функціонує задовільно, але має ознаки перевантаження нелінійними та несиметричними навантаженнями, що призводить до погіршення показників якості електроенергії.

3. РОЗРОБКА ТЕХНІЧНИХ ЗАХОДІВ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

3.1. Загальні положення та вибір напрямів підвищення надійності системи електропостачання

Результати проведених вимірювань, наведених у розділі 2, свідчать, що система електропостачання підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ» у цілому забезпечує роботу технологічного обладнання, однак характеризується підвищеним рівнем гармонічних спотворень, установленого стандартом ДСТУ EN 50160:2014. Найбільші відхилення спостерігаються для 5-ї, 7-ї, 20-ї, 23-ї та 25-ї гармонік, що свідчить про наявність у системі значної частки нелінійних споживачів – зварювальних апаратів, перетворювачів частоти, випрямлячів і джерел імпульсного живлення. Під дією таких навантажень у мережі виникають вищі гармоніки, які спотворюють форму напруги, спричиняють додаткові втрати потужності, підвищення температури обмоток трансформаторів і двигунів, а також прискорене старіння ізоляції.

Погіршення показників якості електроенергії безпосередньо впливає на надійність енергопостачання та ефективність роботи електрообладнання. Для усунення виявлених відхилень доцільним є впровадження комплексу технічних рішень, спрямованих на компенсацію гармонічних складових, стабілізацію напруги та організацію постійного контролю за станом електричної мережі. Основним напрямом підвищення надійності системи електропостачання є застосування активних фільтрів гармонік (AFH), пасивних LC-фільтрів та статичних вар-компенсаторів (SVC, STATCOM), що дозволяють зменшити вплив вищих гармонік, покращити форму напруги та підвищити коефіцієнт потужності. Паралельно із цим необхідним є впровадження автоматичних регуляторів напруги (APH) або динамічних стабілізаторів напруги (DVR), здатних підтримувати рівень напруги в межах допустимих відхилень під час дії змінних навантажень.

Важливою складовою сучасних систем електропостачання є автоматизований моніторинг параметрів якості електроенергії в режимі реального часу. Використання приладів типу PCE-PA 8500 із передачею даних у програмне середовище PowerGraph забезпечує можливість постійного контролю гармонічного складу напруги, рівнів несиметрії та відхилень амплітуди. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти погіршення параметрів, формувати аналітичні звіти й здійснювати корекцію режимів у автоматичному режимі.

У результаті реалізації запропонованих заходів очікується зниження рівня гармонічних спотворень напруги до 3–4 %, стабілізація напруги в межах 230 В \pm 5 %, зменшення втрат потужності у трансформаторах та лініях на 3–5 %, а також підвищення ресурсу електротехнічного обладнання. Таким чином, підвищення надійності системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ» доцільно здійснювати шляхом поєднання технічних засобів компенсації спотворень, стабілізації параметрів напруги та впровадження системи моніторингу якості електроенергії у режимі реального часу, що забезпечить стійку, безперебійну й енергоефективну роботу підприємства.

3.2. Вибір технічних засобів компенсації та покращення якості електроенергії

Покращення показників якості електроенергії є одним із ключових факторів підвищення надійності системи електропостачання підприємства. Як показали результати досліджень, основною причиною погіршення параметрів є вплив нелінійних навантажень, які генерують вищі гармоніки, створюють несиметрію напруги та спричиняють нестабільність амплітуди. Для зменшення цих негативних явищ доцільним є застосування сучасних електронних засобів компенсації та регулювання параметрів електроенергії,

принцип дії яких ґрунтується на активному або реактивному балансуванні енергетичних потоків у мережі.

Активні фільтри гармонік (AFH) працюють за принципом створення компенсуючого струму, який повторює форму гармонічних спотворень, але має протилежну фазу. Мікропроцесорна система аналізує спектр струму в реальному часі, виділяє гармонічні складові та генерує відповідний сигнал, що вводиться в мережу через силовий інвертор. Завдяки цьому гармонічні струми компенсуються, а форма напруги відновлюється до близької до синусоїдальної. Перевагою AFH є універсальність, можливість одночасного придушення кількох гармонік, компенсація реактивної потужності та швидкодія в межах кількох мілісекунд.

Статичний вар-компенсатор (SVC) – це пристрій, який регулює рівень реактивної потужності за допомогою тиристорних елементів. Основними складовими є тиристорно-керований реактор (TCR) і тиристорно-керований конденсатор (TSC). Змінюючи кут відкривання тиристорів, система забезпечує підтримання напруги на заданому рівні та зменшення флуктуацій, викликаних реактивними навантаженнями. SVC ефективно стабілізує напругу в промислових мережах, проте його дія дещо обмежена швидкістю, а також залежить від симетрії навантаження.

STATCOM (Static Synchronous Compensator) є більш сучасним варіантом SVC і базується на використанні напівпровідникового інвертора з широтно-імпульсною модуляцією. Пристрій генерує змінну напругу потрібної амплітуди та фази, що дозволяє динамічно підтримувати баланс активної та реактивної потужності. Перевагою STATCOM є миттєва реакція на зміну навантаження, компактність, можливість роботи при низькій напрузі та висока ефективність компенсації як реактивної, так і частково гармонічної складової.

Динамічний відновлювач напруги (DVR) застосовується для зменшення провалів і перенапруг у мережі. Його принцип дії полягає у введенні додаткової напруги серією через силовий трансформатор у моменти відхилення від номіналу. DVR може компенсувати короточасні зміни

напруги (до 20–30 %), що забезпечує стабільність роботи електродвигунів і чутливих електронних пристроїв. Основною перевагою є здатність швидко відновлювати напругу без впливу на частоту, однак вартість системи є порівняно високою.

Автоматичний регулятор напруги (АРН) призначений для підтримання стабільного рівня напруги шляхом автоматичної зміни коефіцієнта трансформації або керування силовими напівпровідниковими елементами. АРН забезпечує стабільність вихідної напруги в умовах коливань навантаження, підвищує ефективність живлення електроприводів і систем освітлення. Його перевагою є простота конструкції, висока надійність та мінімальні експлуатаційні витрати, однак він не усуває гармонічні спотворення і тому доцільний як допоміжний елемент у комплексі технічних засобів.

Порівняльні характеристики розглянутих пристроїв подано у таблиці 3.1.

З наведеного аналізу видно, що найбільш доцільним для підприємства ПВКП «УКРСТАНДАРТ» є впровадження активних фільтрів гармонік (АФН) у поєднанні з статичними вар-компенсаторами (SVC) або STATCOM, що забезпечить комплексне покращення якості електроенергії — зниження рівня ТНД до 3–4 %, стабілізацію напруги в межах $230 \text{ В} \pm 5 \%$ та зменшення втрат потужності у розподільній мережі. Додаткове застосування АРН дозволить підтримувати стабільний рівень напруги в режимах змінного навантаження, а у перспективі впровадження DVR може бути використане для захисту чутливих споживачів під час короткочасних провалів напруги.

Комплексне використання наведених засобів забезпечить підвищення надійності системи електропостачання, збільшення ресурсу обладнання та створення технічної бази для впровадження системи моніторингу якості електроенергії в реальному часі.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика технічних засобів покращення якості електроенергії

Тип пристрою	Основний принцип дії	Ефективність зниження THD	Регулювання напруги	Реакція на зміну навантаження	Основні переваги	Недоліки	Доцільність застосування
AFH	Генерує зустрічні гармоніки протифазно до спотворень	60–80 %	частково	<10 мс	Висока точність, швидкодія, компенсація реактивної потужності	Висока вартість, складність налаштування	Для нелінійних навантажень і потужних електроприводів
SVC	Керування реактивною потужністю тиристорними елементами	20–30 %	так	20–40 мс	Підтримка напруги, стабільність режиму	Обмежена швидкодія, не усуває високі гармоніки	Для стабілізації напруги у середньовольтних мережах
STATCOM	Інвертор генерує змінну напругу потрібної амплітуди і фази	40–60 %	так	<5 мс	Висока швидкодія, можливість роботи при низькій напрузі	Висока ціна, потребує охолодження	Для динамічних навантажень, сучасних мереж
DVR	Вводить додаткову напругу через трансформатор під час відхилення	не впливає	так	<5 мс	Стабілізація напруги, захист від провалів	Не усуває гармоніки, висока вартість	Для чутливих споживачів, систем автоматизації
APH	Автоматичне регулювання коефіцієнта трансформації	не впливає	так	50–200 мс	Простота, надійність, низька вартість	Немає впливу на гармоніки	Для підтримання напруги у розподільних мережах

3.3. Розробка системи моніторингу показників якості електроенергії в режимі реального часу

Підвищення надійності системи електропостачання тісно пов'язане з можливістю своєчасного виявлення та усунення відхилень показників якості електричної енергії. Традиційні періодичні вимірювання, що виконуються ручними приладами, не забезпечують повної картини змін параметрів у динаміці та не дозволяють оперативно реагувати на виникнення порушень. Тому одним із ключових напрямів удосконалення системи електропостачання є створення автоматизованої системи моніторингу якості електроенергії (АСМ ЯЕЕ), що функціонує у режимі реального часу (рис. 3.1).

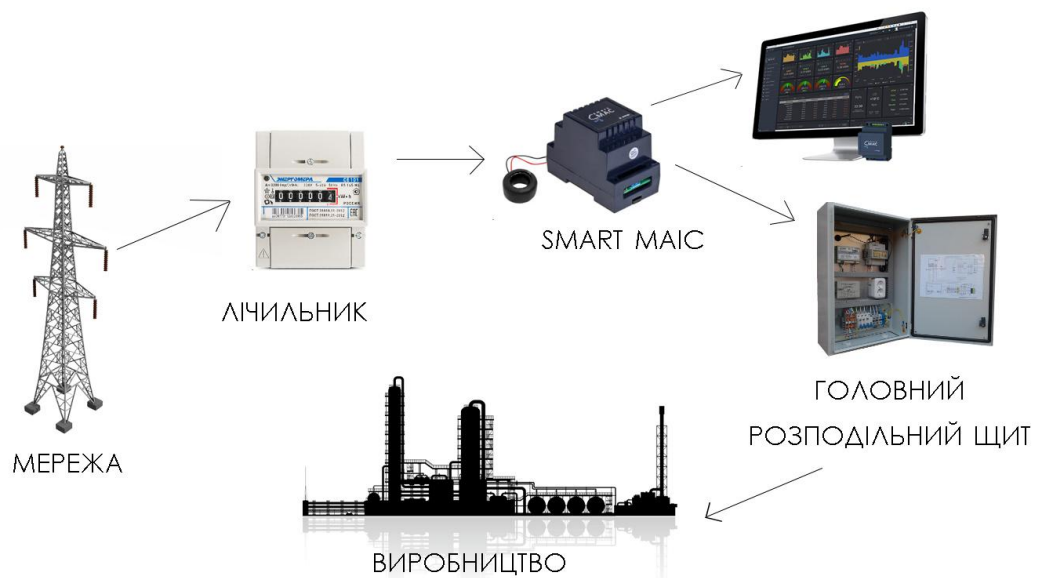


Рис. 3.1 – Структурна схема системи моніторингу показників якості електроенергії в режимі реального часу

Принцип роботи системи базується на безперервному зборі, обробленні та передаванні даних про основні електричні параметри – напругу, струм, частоту, несиметрію, коефіцієнт потужності та спектральний склад сигналу. У вузлових точках мережі, зокрема на вводах трансформаторних підстанцій ТП-1 і ТП-2, встановлюються вимірювальні модулі з цифровими сенсорами та

мікропроцесорними перетворювачами. Ці модулі здатні виконувати вимірювання за класом точності не гірше 0,2S та здійснювати локальний аналіз за алгоритмами відповідно до IEC 61000-4-30:2015.

Зібрані дані передаються по мережі Ethernet або Wi-Fi на центральний сервер, де вони зберігаються у базі даних та обробляються програмним забезпеченням типу PowerGraph, PQSoft або спеціалізованими модулями у середовищі MATLAB/Simulink. Інтерфейс користувача відображає в реальному часі графіки напруги, струмів, частоти, а також спектральні діаграми гармонічних складових і динаміку зміни коефіцієнта THD.

Архітектура системи передбачає три рівні: польовий рівень – прилади вимірювання та датчики; комунікаційний рівень – канали зв'язку і шлюзи передачі даних; аналітичний рівень – сервер моніторингу, база даних та програмне забезпечення для аналізу і візуалізації. Завдяки цьому забезпечується не лише реєстрація миттєвих значень, а й накопичення статистики для подальшої оцінки тенденцій та прогнозування можливих відхилень.

Система моніторингу дозволяє автоматично формувати попереджувальні повідомлення або аварійні сигнали у разі перевищення допустимих меж показників (THD, напруга, струм, частота). Це дає змогу оперативно реагувати на погіршення якості електроенергії та запобігати перевантаженням, перегріву чи відмовам обладнання. Крім того, ведеться архів подій, що дозволяє виконувати ретроспективний аналіз причин збоїв або аварій.

Однією з переваг впровадження АСМ ЯЕЕ є можливість інтеграції з системою диспетчерського керування SCADA, що забезпечує централізований контроль енергетичних процесів підприємства. У разі необхідності система може передавати дані на веб-платформу Energy Cloud або у внутрішню корпоративну мережу для доступу з будь-якого робочого місця.

Використання сучасних приладів, таких як PCE-PA 8500 або аналогічних енергоаналізаторів, забезпечує широкий спектр функцій: вимірювання

гармонічних складових до 50-го порядку, оцінку коефіцієнтів несиметрії напруг і струмів, контроль параметрів частоти та потужності, визначення втрат енергії та побудову осцилограм. У поєднанні з аналітичним програмним забезпеченням вони формують основу інтелектуальної системи енергетичного моніторингу, що відповідає вимогам концепції Smart Grid.

З технічної точки зору, впровадження системи моніторингу забезпечує низку переваг:

- підвищення точності та швидкості контролю показників ЯЕЕ;
- своєчасне виявлення і локалізацію джерел гармонічних спотворень;
- скорочення часу реакції персоналу на аварійні події;
- зниження експлуатаційних витрат і втрат електроенергії;
- можливість автоматичного генерування звітів для енергоаудиту.

Отже, реалізація системи моніторингу показників якості електроенергії в режимі реального часу створює основу для постійного діагностування стану електричної мережі, підвищення надійності та енергоефективності системи електропостачання підприємства. Це дозволяє переходити від реактивного до прогностного керування енергетичними процесами, що є невід'ємною складовою сучасних підходів до управління промисловими енергосистемами..

3.4. Висновки до розділу

У розділі було обґрунтовано технічні рішення, спрямовані на підвищення надійності та енергоефективності системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ». На основі результатів аналізу параметрів якості електроенергії встановлено, що основними причинами зниження надійності є наявність гармонічних спотворень, несиметрія напруг і нестабільність рівня напруги при змінних навантаженнях.

Розроблена концепція вдосконалення системи електропостачання передбачає поєднання технічних засобів компенсації гармонічних складових, стабілізації напруги та автоматизованого контролю показників якості

електроенергії. Визначено, що найбільш ефективним рішенням для умов підприємства є впровадження активних фільтрів гармонік (AFH) у поєднанні зі статичними вар-компенсаторами (SVC або STATCOM), які забезпечують зниження коефіцієнта гармонічних спотворень THD до рівня 3–4 %, покращення симетрії напруг і підвищення коефіцієнта потужності до 0,98. Використання автоматичних регуляторів напруги (АРН) або динамічних стабілізаторів напруги (DVR) дозволяє підтримувати стабільний рівень напруги $230 \text{ В} \pm 5 \%$ навіть за умов змінного навантаження.

Особливу увагу приділено створенню автоматизованої системи моніторингу показників якості електроенергії (АСМ ЯЕЕ), яка здійснює вимірювання параметрів у режимі реального часу на базі сучасних енергоаналізаторів класу А згідно з ІЕС 61000-4-30. Реалізація системи дозволяє оперативно виявляти перевищення допустимих рівнів гармонік, асиметрію напруги чи струмів, коливання частоти, а також фіксувати їх у базі даних для подальшого аналізу. Інтеграція АСМ ЯЕЕ з програмними комплексами PowerGraph, PQSoft або MATLAB/Simulink створює передумови для переходу до концепції розумного енергетичного управління (Smart Grid).

Реалізація запропонованого комплексу технічних заходів забезпечить істотне покращення якості електроенергії, зменшення втрат активної потужності на 3–5 %, підвищення ресурсу електротехнічного обладнання на 15–20 % та зниження аварійності. Упровадження автоматизованої системи моніторингу забезпечить постійний контроль стану мережі, дасть змогу своєчасно реагувати на відхилення й формуватиме базу для подальшої оптимізації енергоспоживання.

Таким чином, розроблені технічні рішення дозволяють створити надійну, адаптивну та енергоефективну систему електропостачання, здатну забезпечувати стабільне живлення технологічного обладнання ПВКП «УКРСТАНДАРТ» і відповідати сучасним вимогам до якості електричної енергії відповідно до стандартів ДСТУ EN 50160:2014 та ІЕС 61000-2-2:2018.

4. ОХОРОНА ПРАЦІ

Організація охорони праці при монтажі та експлуатації системи контролю якості електроенергії. Охорона праці під час монтажу, налагодження та експлуатації системи контролю якості електроенергії є важливою складовою забезпечення безпечних умов праці електротехнічного персоналу та запобігання виникненню нещасних випадків. Всі роботи повинні проводитися відповідно до вимог Закону України «Про охорону праці», Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98), Правил технічної експлуатації електроустановок споживачів (ПТЕЕС), а також ДБН А.3.2-2-2009 «Охорона праці і промислова безпека».

Монтаж системи моніторингу показників якості електроенергії передбачає виконання робіт в електроустановках напругою до 1000 В, зокрема встановлення вимірювальних модулів, датчиків струму і напруги, кабельних з'єднань, комунікаційних пристроїв і шаф збору даних. Допуск до виконання таких робіт мають лише працівники, які пройшли спеціальне навчання, інструктажі, перевірку знань з питань електробезпеки та мають кваліфікаційну групу не нижче III для електроустановок до 1000 В.

Під час виконання монтажних робіт персонал повинен користуватися засобами індивідуального захисту (ЗІЗ): діелектричними рукавичками, килимками, ізолювальними інструментами, захисними окулярами, касками та спецодягом. Перед початком робіт електроустановка має бути знеструмлена, а на вимикачах і рубильниках вивішуються попереджувальні плакати «Не вмикати – працюють люди». Місце роботи огорожується та за потреби організовується заземлення вимірювальних пристроїв.

Особливу увагу слід приділяти встановленню вимірювальних трансформаторів струму (ТТ) і напруги (ТН). Їх монтаж здійснюється лише після перевірки справності ізоляції, маркування вторинних кіл та правильності полярності виводів. Забороняється розмикати вторинні кола ТТ під напругою,

оскільки це може призвести до ураження електричним струмом або виходу з ладу обладнання.

Під час налагодження системи контролю якості електроенергії за допомогою енергоаналізаторів типу PSE-PA 8500 чи аналогічних приладів, необхідно дотримуватися вимог інструкцій виробника. З'єднання до струмових та напругових ланцюгів виконують лише після зняття напруги або через спеціальні рознімні вимірювальні роз'єми. Забороняється підключати або відключати вимірювальні дроти при наявності потенціалу на клеммах.

В експлуатаційний період системи моніторингу оператори повинні здійснювати контроль параметрів із безпечної відстані, використовуючи комп'ютерні термінали або панелі диспетчеризації. Обслуговування та періодична перевірка вимірювальних модулів виконуються згідно з графіком технічного обслуговування. Для запобігання несанкціонованому доступу шафи збору даних повинні бути опломбовані, а програмне забезпечення – захищене паролем.

Особливу небезпеку становить виконання робіт у діючих електроустановках та поблизу струмоведучих частин, тому працівники повинні дотримуватися безпечних відстаней відповідно до вимог ДНАОП 0.00-1.32-01 та ПБЕЕС, а також виконувати роботи лише за нарядом-допуском із зазначенням складу бригади, обсягу робіт і заходів безпеки.

Важливим аспектом є також захист від електромагнітних полів та забезпечення надійного заземлення усіх металевих частин, що не перебувають під напругою, але можуть опинитися під потенціалом у разі пошкодження ізоляції. Рівень освітленості робочих місць має відповідати вимогам ДБН В.2.5-28:2018, а мікроклімат у приміщеннях – ДСН 3.3.6.042-99.

Додатково персонал повинен бути забезпечений аптечкою першої допомоги, знати порядок дій при ураженні електричним струмом, а також мати доступ до вогнегасників типу ВВК-2 (вуглекислотний) або ВП-5 (порошковий).

Аналіз шкідливих та небезпечних факторів при монтажі та експлуатації систем моніторингу якості електроенергії. Під час монтажу та експлуатації систем моніторингу показників якості електроенергії персонал піддається дії низки шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які пов'язані з особливостями електротехнічних робіт і умовами експлуатації електроустановок. Найбільшу небезпеку становить можливість ураження електричним струмом у разі випадкового дотику до струмоведучих частин або під час помилкових комутаційних операцій. Такі ситуації можуть виникати в процесі підключення трансформаторів струму та напруги, енергоаналізаторів, а також при випробуванні вторинних кіл. Крім того, небезпеку становить електрична дуга, що може виникати при коротких замиканнях або замиканні вторинних обмоток трансформаторів струму на розімкнений контур.

Таблиця 4.1 – Аналіз шкідливих і небезпечних факторів при роботі з системою моніторингу якості електроенергії

№	Потенційно небезпечний або шкідливий фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи захисту та профілактики
1	Електричний струм	Струмоведучі частини, клеми вимірювальних приладів	Ураження електричним струмом, опіки	Використання діелектричних рукавиць, килимків, інструменту з ізольованими ручками, робота за нарядом-допуском
2	Електрична дуга або коротке замикання	Монтаж, підключення ТТ, ТН, вимірювальних модулів	Опіки, пошкодження обладнання	Знеструмлення ділянки, перевірка відсутності напруги, заземлення, дотримання безпечних відстаней
3	Електромагнітні поля	Трансформатори струму, кабельні траси	Погіршення самопочуття, функціональні розлади	Обмеження часу перебування, екранізація кабелів, заземлення корпусів
4	Підвищена температура поверхонь обладнання	Прилади моніторингу, шафи збору даних	Опіки, перегрів приміщення	Вентиляція, дотримання температурного режиму (не вище 35 °С)

5	Недостатня освітленість робочої зони	Приміщення ТП, щитові	Зорове навантаження, помилки при з'єднанні	Освітлення не менше 200 лк, лампи з нейтральним спектром
6	Пил, підвищена вологість	Підстанційні приміщення	Погіршення ізоляції, корозія контактів	Ущільнення шаф, контроль мікроклімату, періодичне очищення
7	Падіння або травмування при роботі на висоті	Установлення обладнання на стінах, шафах	Ушкодження, переломи	Використання драбин із запобіжними пристроями, наявність напарника
8	Напруження уваги, стомлюваність	Тривала робота за моніторами	Зниження реакції, помилки	Раціональний режим праці, перерви 10–15 хв кожні 2 години
9	Пожежонебезпека	Короткі замикання, перегрів кабелів	Загоряння, пошкодження обладнання	Використання кабелів з негорючою ізоляцією, наявність вогнегасників ВВК-2 або ВП-5
10	Статична електрика	Кабельні траси, пластикові панелі	Іскріння, ураження мікроелектроніки	Заземлення корпусів, антистатичні підлоги

Додатковими факторами ризику є електромагнітні поля низької частоти, які створюються при роботі перетворювальних пристроїв, трансформаторів та фільтрів. Хоча їх інтенсивність не перевищує допустимі норми, тривалий вплив може спричиняти функціональні розлади нервової системи або погіршення самопочуття. До шкідливих чинників належать також шум і вібрація від роботи вентиляційних систем, підвищена температура корпусів вимірювального обладнання, недостатня освітленість робочої зони у щитових приміщеннях, а також підвищена вологість і запиленість повітря, характерні для трансформаторних підстанцій.

Певну небезпеку становить виконання монтажних робіт на висоті або в обмежених просторах, де можливе травмування через падіння інструменту чи обладнання. При налагодженні та контролі роботи системи на етапі

експлуатації можливі перевантаження зору та нервового напруження через тривалу роботу за моніторами, що вимагає раціональної організації робочого часу і періодичного відпочинку. У процесі тривалої експлуатації системи моніторингу можливі також небезпечні наслідки перегрівання кабелів або з'єднань, які в разі порушення ізоляції можуть стати причиною займання або короткого замикання.

Рекомендації щодо впровадження безпечних умов праці при монтажі та експлуатації систем моніторингу якості електроенергії. Забезпечення безпечних умов праці під час монтажу та експлуатації систем моніторингу показників якості електроенергії є одним із головних завдань організації виробничого процесу на підприємстві. Створення ефективної системи охорони праці повинно базуватися на комплексному підході, що охоплює технічні, організаційні та профілактичні заходи. Усі роботи мають виконуватися відповідно до вимог чинного законодавства України з охорони праці, правил безпечної експлуатації електроустановок та галузевих стандартів, зокрема НПАОП 40.1-1.21-98, ДСТУ ISO 45001:2019 та ДБН А.3.2-2-2009.

Основною умовою забезпечення безпеки є ретельна підготовка робочого місця та попереднє планування монтажних операцій. Перед початком робіт необхідно перевірити стан електроустановки, відсутність напруги на струмоведучих частинах, справність заземлення, ізоляції та вимірювального інструменту. Допуск до робіт на електроустановках має надаватися лише працівникам, які пройшли навчання та перевірку знань з електробезпеки, мають відповідну групу допуску та досвід роботи з вимірювальним обладнанням. У процесі монтажу необхідно забезпечити надійну ізоляцію робочих місць, використовувати діелектричні засоби захисту, дотримуватися безпечних відстаней і уникати роботи поблизу струмоведучих частин під напругою.

Під час експлуатації системи моніторингу особливу увагу слід приділяти правильній організації обслуговування та технічного контролю. Роботи з

перевірки або калібрування енергоаналізаторів мають виконуватися лише після повного знеструмлення відповідних кіл. Оператори системи повинні здійснювати спостереження за показниками з безпечної відстані через комп'ютерні термінали або диспетчерські панелі. Для запобігання несанкціонованому втручанню та електротравмам шафи збору даних мають бути замкнені та опломбовані, а доступ до них надаватися лише уповноваженому персоналу.

Важливим напрямом забезпечення безпечних умов праці є створення належного мікроклімату та освітлення в приміщеннях, де розміщено обладнання системи моніторингу. Освітленість робочих місць повинна відповідати вимогам ДБН В.2.5-28:2018 і становити не менше 200 лк, а температура повітря – у межах 18–25 °С при відносній вологості не більше 70 %. Для зменшення впливу електромагнітних полів доцільно застосовувати екранізацію кабельних трас, а корпуси вимірювальних модулів обов'язково підключати до заземлювального контуру.

Суттєвим елементом профілактики травматизму є впровадження систематичного навчання персоналу правилам безпеки, проведення інструктажів, перевірки знань та періодичних медичних оглядів. Працівники повинні знати порядок дій у разі виникнення аварійної ситуації, ураження електричним струмом або займання електрообладнання. Кожне робоче місце має бути забезпечене аптечкою першої допомоги, засобами пожежогасіння, а в приміщеннях, де встановлено електрообладнання, повинні бути вогнегасники типу ВВК-2 або ВП-5.

Підвищення культури безпеки праці досягається завдяки постійному моніторингу стану охорони праці, аналізу потенційних ризиків, а також застосуванню сучасних інформаційних технологій для контролю технічного стану електроустановок. Важливим є впровадження системи управління охороною праці на основі ризик-орієнтованого підходу, який передбачає виявлення, оцінку та мінімізацію небезпек ще до початку виконання робіт.

Висновки. Реалізація запропонованих заходів дозволяє створити безпечні умови праці для персоналу, який здійснює монтаж, налагодження та експлуатацію системи моніторингу показників якості електроенергії, знизити ймовірність виникнення аварійних ситуацій, запобігти травматизму та забезпечити стабільну, надійну роботу енергетичного обладнання підприємства. Таким чином, комплексне дотримання вимог безпеки праці є необхідною умовою ефективного функціонування системи моніторингу якості електроенергії та важливою складовою підвищення загальної надійності системи електропостачання підприємства.

5. ЕКОНОМІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ

Економічна доцільність упровадження системи моніторингу показників якості електроенергії на підприємстві ПВКП «УКРСТАНДАРТ» підтверджується розрахунками, що враховують сучасні тарифи на електроенергію для промислових споживачів. Середня вартість 1 кВт·год електричної енергії на момент розрахунку становить 12 грн/кВт·год, що істотно підвищує значення економії навіть при незначному зменшенні втрат.

Вихідні дані: річне споживання електроенергії підприємством – 250 тис. кВт·год, середні втрати від гармонічних спотворень – 3 %, прогнозоване зниження втрат після впровадження системи – до 1,5 %.

Тоді економія електроенергії становить:

$$E_{ек} = 250000 \cdot 0.015 = 3750 \text{ кВт} \cdot \text{год} / \text{рік}.$$

Грошовий еквівалент цієї економії:

$$C_{ек} = 3750 \cdot 12 = 45000 \text{ грн} / \text{рік}.$$

Крім цього, очікується зниження аварійних і ремонтних витрат на 25 % (приблизно 15 тис. грн/рік), що дає сумарний річний економічний ефект:

$$E = 45000 + 15000 = 60000 \text{ грн} / \text{рік}.$$

Вартість проєкту впровадження системи моніторингу показників якості електроенергії складає близько 95 000 грн, включаючи енергоаналізатор, датчики, сервер збору даних і програмне забезпечення. Тоді термін окупності становить:

$$T_{ок} = \frac{95000}{60000} = 1.6 \text{ роки.}$$

Таблиця 5.1 – Економічний ефект від упровадження системи моніторингу якості електроенергії

Показник	До впровадження	Після впровадження	Ефект
Річне споживання, кВт·год	250 000	250 000	—
Частка технічних втрат через неякісне живлення, %	3,0	1,5	-1,5
Втрати енергії, кВт·год/рік	7 500	3 750	-3750
Вартість втраченої енергії, грн/рік (12 грн/кВт·год)	90 000	45 000	-45000
Витрати на аварійні ремонти та ЗІП, грн/рік	60 000	45 000	-15000
Сумарні витрати, грн/рік	150 000	90 000	-60000
Капітальні витрати (одноразово), грн	—	95 000	—
Термін окупності, років	—	—	1,6

Висновки до розділу. Таким чином, реалізація проєкту окупиться менш ніж за два роки, після чого підприємство щорічно отримуватиме економічний ефект понад 60 тис. грн.

Окрім прямої економії електроенергії, важливим є зниження непрямих втрат: зменшення простоїв обладнання, підвищення ресурсу електродвигунів і трансформаторів, а також зниження штрафних санкцій від енергопостачальної організації за низький коефіцієнт потужності або порушення параметрів якості. За умови включення цих факторів у розрахунок, загальний економічний ефект може перевищити 80–90 тис. грн/рік, що скорочує термін окупності системи до близько одного року.

Таким чином, впровадження системи моніторингу показників якості електроенергії на ПМКП «УКРСТАНДАРТ» є не лише технічно доцільним, а й економічно вигідним рішенням, яке забезпечує зменшення енергетичних втрат, підвищення стабільності електропостачання та створює передумови для подальшої автоматизації системи енергоменеджменту підприємства.

ВИСНОВКИ ТА ПРОПОЗИЦІЇ

У дипломній роботі виконано комплексне дослідження проблеми підвищення надійності системи електропостачання ПВКП «УКРСТАНДАРТ» шляхом впровадження моніторингу показників якості електроенергії в режимі реального часу. На підставі аналізу нормативних документів (ДСТУ EN 50160:2014, ІЕС 61000-4-30:2015, ІЕС 61000-2-2:2018) та експериментальних вимірювань визначено основні причини зниження якості електроенергії – перевищення гармонічних складових, коливання та несиметрія напруг, що призводять до втрат активної потужності та скорочення ресурсу електрообладнання.

Вимірювання, проведені на трансформаторних підстанціях ТП-1 і ТП-2, показали, що частка 3-ї, 5-ї та 7-ї гармонік у загальному спектрі сягала 60–70 % усіх спотворень. Середнє відхилення напруги від номінального рівня становило +6 %, а коефіцієнт несиметрії напруг досягав 2,1 % (при нормі 2 %). Частота мережі перебувала у межах 49,9–50,2 Гц, що відповідає стандарту.

Проведений аналіз показав, що перевищення ТНД на 2–3 % спричиняє зростання втрат активної потужності в трансформаторах на 1,5–2,5 %, а також додаткове теплове навантаження на кабельні лінії, що зменшує їхній ресурс на 10–15 %. Унаслідок цього сумарні втрати електроенергії на підприємстві оцінено на рівні 7,5 тис. кВт·год/рік.

Для усунення виявлених відхилень запропоновано комплекс технічних рішень, що включає:

- установлення активного фільтра гармонік (AFH) продуктивністю 40 А, який забезпечує зниження рівня гармонічних складових напруги до 3,5–4,0 %;
- застосування статичного вар-компенсатора (SVC) потужністю 50 квар для корекції коефіцієнта потужності до $\cos\varphi = 0,98–0,99$;
- упровадження автоматичного регулятора напруги (АРН) для стабілізації напруги на рівні 230 В ± 5 %;

- створення автоматизованої системи моніторингу якості електроенергії (АСМ ЯЕЕ), що забезпечує контроль 25 показників якості з дискретністю 1 с у реальному часі.

Розроблена структура системи моніторингу передбачає встановлення трьох вузлів вимірювання (на вводах ТП-1, ТП-2 і на головному щиті), передачу даних по мережі Ethernet на сервер збору інформації, а також візуалізацію результатів через програмне середовище PowerGraph або MATLAB/Simulink. Система дозволяє архівувати дані за добу, тиждень і місяць, формувати звіти відповідності стандарту ДСТУ EN 50160, а також автоматично генерувати попередження при перевищенні допустимих меж.

Результати техніко-економічного аналізу показали, що після впровадження системи моніторингу втрати електроенергії зменшуються з 3 % до 1,5 %, що відповідає щорічній економії 3,75 тис. кВт·год, або 45 тис. грн/рік за чинного тарифу 12 грн/кВт·год. Додатково зменшуються витрати на аварійне обслуговування на 15 тис. грн/рік, що формує сумарний економічний ефект близько 60 тис. грн/рік. При загальних інвестиційних витратах 95 тис. грн термін окупності становить 1,6 року, а внутрішня норма прибутковості (IRR) – понад 60 %.

Для подальшого підвищення ефективності системи електропостачання доцільно інтегрувати АСМ ЯЕЕ з системою енергоменеджменту підприємства, запровадити дистанційний моніторинг через хмарну платформу, а також реалізувати функцію автоматичного керування компенсвальними пристроями залежно від поточного рівня гармонік. Доцільно також розширити систему за рахунок контролю споживання за окремими технологічними лініями та запровадити алгоритми прогнозування навантаження з використанням методів машинного навчання.

Результати дослідження підтверджують, що впровадження системи моніторингу якості електроенергії є ефективним інструментом підвищення надійності, енергоефективності та економічної стабільності системи електропостачання промислових підприємств.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Ali K., Wiyagi R. O., Syahputra R. Reliability Analysis of Power Distribution System. *Journal of Electrical Technology UMY*, Vol. 1, No. 2, 2017.
2. Ahmad S., et al. Reliability Enhancement of Electric Distribution Network. *Sustainability*, 2021, 13(20): 11315. DOI: 10.3390/su132011315.
3. Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H. Power Quality Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems in Distribution Networks. *Przeгляд Elektrotechniczny*, 2013, 89(2a): 45–52.
4. Володарський Е. Т., Волошко А. В. Monitoring system of electricity quality in decentralized electricity supply systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(8(69)), 2020.
5. Reddy M. J. B., Mohanta D. K. A multifunctional real-time power quality monitoring system using cloud computing technology. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2024, 8(2): 134–143.
6. González-de-la-Rosa J.–J., Florencias-Oliveros O. Strategy for Visual Measurement of Power Quality Based on Higher-Order Statistics and Exploratory Big Data Analysis. *Applied Sciences*, 2025, 15(12): 6422.
7. Kumar C. S., et al. The power quality measurements and real-time monitoring of distribution feeders using PQ analyzer. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 304: 127-144.
8. Vanin A. S. Quality monitoring of electrical power to evaluate the reliability of distribution grids. *Power Technology & Engineering*, 2016, 50(8): 859-866.
9. Caicedo J. E., Agudelo-Martínez D., Rivas-Trujillo E. A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8: 3.
10. Luo F., et al. Power supply reliability analysis of distribution systems considering unreliable transmission information. *Energies*, 2023, 16(23): 7826.
11. Baptista J. (ed.) *Power Quality of Renewable Energy Source Systems*. – *Energies*, 2022, 15(9): 3075. DOI: 10.3390/en15093075.

12. ДСТУ EN 50160:2014. Характеристики напруги електроенергії в електричних мережах загального призначення. – Київ: Мінекономрозвитку України, 2015.
13. Czarnecki L. S. Power Quality Issues and Related Problems in Electrical Systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2020, 35(4): 1927–1934.
14. Ahsan S. M., Al-Adhaileh M. H., Ullah I. et al. Harmonic Analysis of Grid-Connected Solar PV Systems. *Sustainability*, 2021, 13(21): 12156. DOI: 10.3390/su132112156.
15. Vanin A. S. Quality Monitoring of Electrical Power to Evaluate the Reliability of Distribution Grids. *Power Technology & Engineering*, 2016, 50(8): 859–866.
16. Reddy M. J. B., Mohanta D. K. A Multifunctional Real-Time Power Quality Monitoring System Using Cloud Computing Technology. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2024, 8(2): 134–143.
17. Baghini A. (ed.) *Handbook of Power Quality*. – Wiley, 2022. ISBN 978-0-470-06720-7.
18. Bollen M. H. J., Gu I. Y. H. *Signal Processing of Power Quality Disturbances*. – Wiley-IEEE Press, 2020. ISBN 978-0-471-73169-4.
19. Chicco G., Schlabach J. Voltage Control and Regulation in Distribution Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2018, 33(3): 2358–2368.
20. Styś T., Sikorski T. Impact of Nonlinear Loads on Power Quality Parameters in Low-Voltage Grids. *Energies*, 2020, 13(24): 6537. DOI: 10.3390/en13246537.
21. Wu J., Wang Y., Lin Y. Voltage Fluctuation Analysis in Distribution Systems with High PV Penetration. *Electric Power Systems Research*, 2021, 194: 107023.
22. Kundur P. *Power System Stability and Control*. – McGraw-Hill, 2020. ISBN 978-0-07-035958-1.
23. Farias F. J., da Silva L. C. P., Oliveira C. Real-Time Voltage Monitoring for Power Quality Improvement in Industrial Systems. *Measurement*, 2022, 190: 110727. DOI: 10.1016/j.measurement.2022.110727.

24. Kusic G. L. *Power Quality in Electrical Systems*. – McGraw-Hill, 2021. ISBN 978-1-260-45793-1.
25. Zobaa A. F., Bansal R. C. *Handbook of Renewable Energy Technology and Systems*. – CRC Press, 2021. DOI: 10.1201/9781003170298.
26. Luna A., Rodríguez P., Teodorescu R. Voltage Variations and Flicker in Wind Power Systems. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2018, 33(2): 764–773.
27. Singh B., Chandra A., Al-Haddad K. *Power Quality: Problems and Mitigation Techniques*. – Wiley, 2015. ISBN 978-1-118-92012-3.
28. Arrillaga J., Watson N. R. *Power System Harmonics*. – Wiley, 2018. ISBN 978-1-119-21954-8.
29. Hanzelka Z., Szweda M. Harmonics Generated by Arc Furnaces in Industrial Networks. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2020, 56(5): 5123-5132.
30. Dugan R. C., McGranaghan M. F., Beaty H. W. *Electrical Power Systems Quality*. – McGraw-Hill, 2021. ISBN 978-1-260-45785-6.
31. Mishra M. K., Kannan S. N. PWM Techniques and Their Influence on Harmonic Emission in Smart-Grid Inverters. *Energies*, 2022, 15(18): 6785. DOI: 10.3390/en15186785.
32. Marin L., Tricoli P. Analysis of Harmonic Distortion in Grid-Connected PV Inverters under Variable Irradiance. *Renewable Energy*, 2023, 205: 278-288. DOI: 10.1016/j.renene.2023.01.102.
33. Dobrzynski K. Voltage and Current Unbalance Reduction in Power Networks with High Penetration of Single-Phase Sources. *Energies*, 2024, 17(11): 2780. DOI: 10.3390/en17112780.
34. Fan J., Kockar I. Flexibility Service Design for Mitigating Voltage Unbalance in the Distribution Network. *IEEE PowerTech 2023 Proceedings*, 2023.
35. *Voltage Unbalance: Power Quality Issues, Related Standards and Mitigation Techniques*. Technical Report, EPRI, 2013.

36. Хворост Т.В, Василенко О.О., Семерня О.В., Шандиба О.Б. (2021). Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних роботах студентами інженерно-технологічного факультету Ступінь вищої освіти: магістр. - Суми: СНАУ, 2021. – 10 с.
37. Грибан В. Г., Негодченко О. В. Охорона праці. Навч. посіб. 2-ге вид.- К.: Центр учбової літератури, 2019. - 280 с.
38. Економіка енергетики : підручник / Є. Г. Скловська [та ін.] ; НТУУ “КПІ”. – 2-ге вид., випр. та доп. – Київ : Каравела, 2019. – 492 с.

ДОДАТКИ