МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Електричної інженерії та кіберфізичних систем
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

перший (бакалаврський) рівень
(рівень вищої освіти)

на темуАналіз енергоефективності підвищення якості електричної енергії в умовах металургійного підприємства

Виконав: студент 4 курсу
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
освітньої програми Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(назва освітньої програми)
Н.М. Павліченко
(ініціали та прізвище)

Керівник д.т.н., проф. Коваленко В.Л.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент к.т.н., доц. Башлій С.В.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерний навчально-науковий інститут_____
Кафедра____Електричної інженерії та кіберфізичних систем _____
Рівень вищої освіти____перший (бакалавський) рівень_____
Спеціальність __141 Електроенергетика,електротехніка та електромеханіка
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)
Освітня програма Електроенергетика,електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри
к.т.н., доц._____Д.М. Морозов
«_____»_____2026__року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ

_____Павліченко Наталія Михайлівна_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи _Аналіз енергоефективності підвищення якості електричної енергії в умовах металургійного підприємства
керівник роботи ___д.т.н., проф. Коваленко В.Л.____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «_23_»_грудня__2025__року №_1833 - с_____
2 Строк подання студентом роботи _____11червня 2026 р._____
3 Вихідні дані до роботи Показники якості електроенергії системи електропостачання цеху відмінні від нормативів; розробка рекомендацій щодо нормалізації якості електроенергії; розрахунок втрат потужності і електричної енергії в системі внутрішньозаводського електропостачання; дослідження енергетичних показників роботи асинхронних двигунів в умовах неякісної електричної енергії
4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _1) Аналіз показників якості електроенергії на межі балансової приналежності копрового цеху. 2) Дослідження можливості підвищення енергоефективності копрового цеху 3) Техніко-економічні розрахунки щодо підвищення ефективності копрового цеху.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) 1) Аналіз енергоспоживання копрового цеху. 2) Вплив відхилення показників якості електроенергії на роботу асинхронного двигуна. 3) Структурна схема факторів впливу та наслідків роботи АД при живленні неякісною електроенергією. 4) Електрична принципова схема експериментальної дослідної установки. Плакат. 5) Дослідження при різних коефіцієнтах завантаження асинхронного двигуна.

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 2	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		
Розділ 3	Коваленко В.Л., д.т.н., проф.		

7 Дата видачі завдання 01.02.2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз показників якості електроенергії на межі балансової приналежності копрового цеху	01.03.2026	
2	Дослідження можливості підвищення енергоефективності копрового цеху	01.04.2026	
3	Техніко-економічні розрахунки щодо підвищення ефективності копрового цеху	10.05.2026	

Студент _____ Н.М. Павліченко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи _____ В.Л. Коваленко
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ С.В. Башлій
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота містить 123 сторінок, 10 рисунків, 12 таблиць, 15 використаних джерел

Об'єктом дослідження є система електроспоживання та електропостачання копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь».

Предметом дослідження є вплив показників якості електричної енергії на енергетичні характеристики технологічного й електромеханічного обладнання копрового цеху, втрати активної потужності та ефективність функціонування внутрішньої системи електропостачання підприємства.

Метою роботи є підвищення енергоефективності системи електропостачання копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь» шляхом дослідження фактичних показників якості електричної енергії, визначення їхнього впливу на роботу асинхронних двигунів та обґрунтування технічних і економічних заходів із компенсації реактивної потужності, зниження гармонійних спотворень і несиметрії напруги.

У роботі проаналізовано сучасний стан металургійної галузі України та визначено основні особливості електроспоживання ПрАТ «Дніпроспецсталь». Установлено, що металургійне виробництво характеризується значною концентрацією потужного електротехнологічного та електромеханічного обладнання, до складу якого входять електричні печі, перетворювальні установки, трансформатори, асинхронні двигуни, насоси, компресори, вентилятори, конвеєри та підіймальні механізми.

Розглянуто основні показники якості електричної енергії, зокрема відхилення та коливання напруги, флікер, провали й підвищення напруги, короткочасні переривання електропостачання, несиметрію трифазної системи, гармонійні та інтергармонійні складові. Проаналізовано сучасні нормативні вимоги до характеристик напруги відповідно до ДСТУ EN 50160:2023 та методи

вимірювання показників якості електроенергії згідно з ДСТУ EN 61000-4-30:2022.

Обґрунтовано необхідність проведення систематичного інструментального контролю показників якості електроенергії на межі балансової належності підприємства, на секціях шин напругою 10 кВ, трансформаторних підстанціях і безпосередньо біля потужних електроприймачів. Розглянуто організаційні вимоги до проведення вимірювань, вибору характерних контрольних точок, тривалості спостереження, синхронізації вимірювальних приладів та ведення журналу технологічних подій.

Для контролю параметрів електричної мережі розглянуто можливість застосування реєстратора показників якості електроенергії ПАРМА РК 3.01. Визначено, що використання такого приладу потребує перевірки його технічного стану, метрологічних характеристик, правильності налаштування коефіцієнтів трансформації та відповідності отриманих результатів чинним нормативним вимогам.

Особливу увагу приділено дослідженню впливу неякісної електричної енергії на роботу асинхронних двигунів. Установлено, що несиметрія напруги спричиняє появу струмів зворотної послідовності, додаткових втрат у статорі та роторі, зниження електромагнітного моменту, посилення вібрацій і перегрівання обмоток. Наявність вищих гармонік призводить до збільшення діючого значення струму, втрат у міді та сталі, виникнення паразитних електромагнітних моментів, зниження коефіцієнта корисної дії та скорочення строку служби ізоляції.

Проаналізовано залежність характеристик асинхронного двигуна від коефіцієнта його завантаження та показників якості напруги. Показано, що за наближення механічного навантаження до номінального двигун стає більш чутливим до відхилень напруги, несиметрії та несинусоїдальності. Для комплексного оцінювання впливу зазначених чинників застосовано метод планування експерименту Бокса — Вілсона.

У роботі визначено додаткові втрати активної потужності та електричної енергії, які виникають у трансформаторах, кабельних лініях і обмотках електродвигунів унаслідок передавання реактивної потужності та протікання несинусоїдальних струмів. Установлено, що зменшення реактивного навантаження та рівня вищих гармонік дозволяє скоротити струмове навантаження елементів мережі, покращити їхній тепловий режим і вивільнити частину пропускної здатності системи електропостачання.

Проведено аналіз технічного стану та умов експлуатації наявних фільтрокомпенсувальних пристроїв. Визначено, що обладнання, встановлене на підприємстві в попередні періоди, потребує повторної перевірки у зв’язку зі зміною складу електричного навантаження, конфігурації мережі, потужності короткого замикання та гармонійного спектра. Обґрунтовано необхідність перевірки фактичної ємності конденсаторів, індуктивності реакторів, частоти налаштування фільтрів і можливості виникнення резонансних режимів.

Запропоновано технічні заходи з підвищення якості електроенергії та енергоефективності підприємства. До них належать реконструкція і переналаштування наявних пасивних фільтрів, застосування детюнованих конденсаторних батарей, активних і гібридних фільтрів, статичних генераторів реактивної потужності та статичних тиристорних компенсаторів. Вибір конкретного технічного рішення запропоновано здійснювати залежно від потужності, характеру й тривалості навантаження, гармонійного складу струмів та необхідної швидкодії компенсаційного обладнання.

Виконано техніко-економічне порівняння варіантів реконструкції та заміни фільтрокомпенсувальних пристроїв. Під час розрахунків ураховано капітальні інвестиції, податковий кредит із ПДВ, експлуатаційні й ремонтні витрати, амортизаційні відрахування, зменшення втрат електроенергії та додаткові грошові потоки від операційної діяльності.

Загальна величина капітальних інвестицій становить 120,0 тис. грн, а чисті інвестиційні витрати з урахуванням податкового кредиту з ПДВ — 96,0 тис. грн. Простий строк окупності запропонованого заходу становить приблизно 2,48 року, а дисконтований — близько 2,93 року. На кінець 2025 року чистий кумулятивний грошовий потік становить 411,16 тис. грн, чистий дисконтований дохід — 102,04 тис. грн, а індекс прибутковості інвестицій — близько 2,17.

Отримані значення фінансово-економічних показників підтверджують доцільність реконструкції та налагодження фільтрокомпенсувальних пристроїв. Реалізація запропонованих заходів дозволить скоротити втрати електроенергії, зменшити споживання реактивної потужності, покращити рівень напруги, знизити гармонійні спотворення, підвищити надійність асинхронних електроприводів та продовжити строк експлуатації електротехнічного обладнання.

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості їх використання під час модернізації системи електропостачання копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь», вибору параметрів компенсаційного обладнання, організації моніторингу якості електроенергії та розроблення заходів із підвищення енергетичної й економічної ефективності підприємства.

Ключові слова: ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, АСИНХРОННИЙ ДВИГУН, НЕСИМЕТРІЯ НАПРУГИ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ, РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, ФІЛЬТРОКОМПЕНСУВАЛЬНИЙ ПРИСТРІЙ, КОНДЕНСАТОРНА БАТАРЕЯ, ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, ДИСКОНТОВАНИЙ ГРОШОВИЙ ПОТІК, СТРОК ОКУПНОСТІ.

ЗМІСТ

Вступ ……..9

1 Аналіз показників якості електроенергії в умовах ПрАТ «Дніпроспецсталь» ……15

1.1 Т Теоретичні відомості про показники якості електричної енергії ……15

1.2 Законодавчі вимоги щодо управління якістю електроенергії……17

1.3 Вимоги до якості електричної енергії на підприємстві ……..19

1.4 Стандарти якості електроенергії на підприємстві ……..20

1.5 Організаційні заходи щодо вимірювання показників якості на підприємстві ……...……...26

1.6 Вибір точок вимірювання та контроль якості електричної енергії ……32

1.7 Засоби вимірювання показників якості електроенергії ……35

1.8 Вплив електромагнітних перешкод …….....44

1.9 Контроль показників якості електричної енергії ……..50

1.9.1 Основні види контролю показників якості електричної енергії ……50

1.9.2. Стандарт контролю якості електрично енергії ……57

1.9.3. Знижки та надбавки в тарифах на якість електричної енергії……..57

1.10 Коротка характеристика об’єкта дослідження ……..59

2 Дослідження можливості підвищення енергоефективності ПрАТ «Дніпроспецсталь»…….....66

2.1 Постановка задач дослідження……..66

2.2 Класифікація основних чинників, які мають вплив на продуктивність асинхронного двигуна під час живлення електроенергією низької якості …….....72

2.3 Короткий опис алгоритму розрахунку загальних втрат..……79
2.4 Вивчення впливу параметрів якості електроенергії на роботу асинхронного двигуна …….....85
3 Техніко-економічні розрахунки варіантів підвищення енергоефективності ПрАТ «Дніпроспецсталь»…….….96
3.1. Обґрунтування доцільності впровадження заходів зі зниження споживання реактивної енергії ……..96
3.2 Визначення економічних показників впровадження компенсації реактивної потужності фільтрокомпенсуючими пристроями .101
3.3 Визначення фінансово-економічних показників варіантів реконструкції та заміни ФКП ……105
Висновки……..115
Перелік посилань……....123

ВСТУП

Металургійний комплекс залишається однією зі стратегічних складових промисловості України, оскільки забезпечує виробництво чавуну, сталі, прокату, труб, феросплавів та інших конструкційних матеріалів, необхідних для машинобудування, будівництва, енергетики, транспортної інфраструктури й оборонної промисловості. У 2024–2025 роках українська металургія працювала в умовах воєнних ризиків, обмежених виробничих потужностей, нестабільного електропостачання, високої вартості енергоресурсів і порушення традиційних логістичних ланцюгів. У 2024 році в Україні було вироблено близько 7,58 млн т сталі, а за підсумками 2025 року — приблизно 7,41 млн т. Незважаючи на суттєве скорочення порівняно з довоєнним періодом, металургійна галузь продовжує відігравати важливу роль у формуванні промислового виробництва та експортного потенціалу країни.

Одним із найбільш енергоємних напрямів металургійного виробництва є випуск сортового, листового, спеціального та трубного прокату. Робота прокатних станів, електричних печей, насосів, компресорів, вентиляторів, димососів, підіймально-транспортного й допоміжного обладнання супроводжується значним споживанням активної та реактивної електричної енергії. Тому в сучасних умовах підвищення енергоефективності металургійних підприємств повинно передбачати не лише заміну застарілого устаткування, але й удосконалення систем електропостачання, автоматизацію контролю режимів електроспоживання, компенсацію реактивної потужності та нормалізацію показників якості електричної енергії.

Основними електромеханічними споживачами металургійних підприємств є електроприводи змінного і постійного струму. Найбільшого поширення набули трифазні асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, що пояснюється простотою їх конструкції, високою експлуатаційною надійністю, відносно невеликою вартістю та можливістю застосування в широкому діапазоні

потужностей. Такі двигуни використовуються у приводах насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів, дробарок, ножиць, прокатних механізмів та іншого технологічного обладнання.

Електричні машини проєктуються для роботи за симетричної трифазної системи напруг, близької до синусоїдальної форми, з номінальними значеннями частоти та напруги. У реальних промислових мережах зазначені умови не завжди виконуються. До найбільш характерних порушень належать відхилення та коливання напруги, провали напруги, несиметрія трифазної системи, наявність вищих гармонік, інтергармонік і субгармонік, а також короткочасні переривання електропостачання.

Погіршення якості електроенергії призводить до зростання струмів і додаткових втрат потужності в обмотках та магнітопроводі асинхронного двигуна. У результаті підвищується температура активних частин машини, зменшується коефіцієнт корисної дії, виникають пульсації електромагнітного моменту, вібрації та шум, прискорюється старіння ізоляції. Особливо небезпечним є одночасний вплив декількох порушень. Експериментальні дослідження, опубліковані у 2024 році, показують, що поєднання несиметрії напруги із субгармоніками може значно посилювати пульсації моменту та вібрацію електропривода порівняно з окремим впливом кожного з цих факторів [2].

Важливим фактором є також пуск потужних асинхронних двигунів. Під час прямого пуску виникають значні пускові струми, які можуть спричиняти провали напруги на шинах промислової мережі, порушувати роботу інших електроприймачів і викликати спрацювання пристроїв захисту. Дослідження реальної промислової мережі середньої напруги показало, що глибина провалу залежить не лише від потужності двигуна, але й від конфігурації мережі, потужності джерел живлення, режиму регулювання напруги та узгодженості пристроїв релейного захисту [1].

Провали напруги та короткочасні переривання електропостачання також можуть спричиняти гальмування асинхронних двигунів, а після відновлення

напруги — одночасний самозапуск значної кількості електроприводів. Такий режим супроводжується повторними кидками струму та додатковим зниженням напруги. У дослідженні 2025 року запропоновано моделювати процеси вибігу та повторного розгону двигуна з урахуванням електромагнітного моменту, моменту навантаження, тривалості провалу та залишкової швидкості ротора [6].

Таким чином, проблема якості електричної енергії безпосередньо пов’язана з енергоефективністю, надійністю та технологічною стійкістю металургійного виробництва. Її вирішення потребує проведення інструментальних вимірювань, аналізу режимів роботи електроприймачів, визначення джерел спотворення та оцінювання ефективності чинних засобів компенсації.

Об’єктом дослідження є система електроспоживання та електропостачання копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь».

Предметом дослідження є вплив показників якості електричної енергії на енергетичні характеристики технологічного та електромеханічного обладнання копрового цеху, а також на втрати потужності й ефективність його системи електропостачання.

Метою роботи є підвищення енергоефективності системи електропостачання копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь» шляхом оцінювання фактичних показників якості електричної енергії, визначення їхнього впливу на роботу асинхронних двигунів та обґрунтування технічних заходів із компенсації реактивної потужності, зменшення гармонійних спотворень і несиметрії напруг.

За наявною технічною документацією підприємства, перші комплексні роботи з компенсації реактивної потужності та зменшення рівня вищих гармонік у системі електропостачання були виконані ще на початку 1990-х років. До секцій шин напругою 10 кВ, від яких живляться потужні перетворювальні установки, було підключено фільтрокомпенсувальні пристрої. На окремих секціях застосовувалися стандартні установки типу ТКРМ, а також фільтрові батареї БК-3, БК-4, БК-5 і спеціально розроблена установка БК-6.

На другій секції першої системи шин фільтрокомпенсувальний пристрій не був установлений через особливості схеми живлення та режимів роботи трансформатора Т-2 підстанції оператора системи розподілу. Водночас упродовж подальшої експлуатації змінювалися склад і характеристики електрообладнання, конфігурація внутрішньої системи електропостачання, режими технологічного навантаження та схеми підключення компенсаційних пристроїв. Тому станом на 2024–2025 роки параметри наявних установок потребують повторної перевірки на відповідність фактичному спектру гармонік, потужності короткого замикання та характеру навантаження.

Сучасні дослідження свідчать, що ефективність пасивних гармонійних фільтрів істотно залежить від опору мережі, рівня фонових спотворень, параметрів нелінійного навантаження, частоти налаштування та фактичної потужності фільтра. Гармонічні струми, які надходять від зовнішніх джерел спотворень, можуть додатково навантажувати фільтр, тому вибір його параметрів лише за характеристиками внутрішнього навантаження є недостатнім [3].

У системі електропостачання підприємства також експлуатуються потужні однофазні й нелінійні електроприймачі, зокрема електротермічне та перетворювальне обладнання. Їх робота може спричиняти несиметрію струмів і напруг, генерування вищих гармонік, коливання реактивної потужності та погіршення коефіцієнта потужності. Застосування звичайних конденсаторних установок без урахування гармонійного складу струмів може створити умови для резонансу та перевантаження конденсаторів.

Перспективним напрямом модернізації є застосування статичних генераторів реактивної потужності, статичних тиристорних компенсаторів, активних і гібридних фільтрів. Дослідження промислової мережі з різкозмінним тиристорним навантаженням підтвердило, що статичний генератор реактивної потужності може одночасно компенсувати реактивне навантаження, зменшувати вищі гармоніки струму та обмежувати коливання напруги [4].

Результати, опубліковані у 2025 році, також підтверджують ефективність трифазних шунтувальних активних фільтрів для компенсації гармонійних складових нелінійних навантажень у точці спільного приєднання [5]. Для промислових мереж прокатних станів доцільним є застосування статичних тиристорних компенсаторів SVC, які забезпечують швидке та безперервне регулювання реактивної потужності, стабілізацію напруги, зменшення флікера і, за спільної роботи з гармонійними фільтрами, зниження спотворень, спричинених нелінійними електроприймачами [7].

Не всі показники якості електричної енергії однаковою мірою залежать від роботи конкретного промислового підприємства. Відхилення частоти переважно визначається балансом активної потужності в об’єднаній енергосистемі, тому окремий промисловий споживач має обмежений вплив на цей показник. Провали, перенапруги та короткочасні переривання можуть виникати як у зовнішній мережі, так і внаслідок комутацій, аварій або пусків потужного обладнання всередині підприємства.

Несиметрія, коливання напруги та гармонійні спотворення значною мірою залежать від режимів роботи потужних однофазних і нелінійних електроприймачів. Рівень напруги та втрати в елементах внутрішньої мережі також пов’язані зі споживанням реактивної потужності. Тому завдання забезпечення якості електричної енергії необхідно розглядати спільно із завданням компенсації реактивної потужності, зменшення струмового навантаження кабельних ліній і трансформаторів та оптимізації режимів роботи електроприводів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

Провести вимірювання показників якості електричної енергії в характерних точках системи електропостачання та на межі балансової належності копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь».

Визначити відхилення напруги, коефіцієнти несиметрії, рівні гармонійних спотворень, величини реактивної потужності, коефіцієнт потужності та параметри короткочасних змін напруги.

Розрахувати втрати активної потужності й електричної енергії у трансформаторах, кабельних лініях та інших елементах внутрішньої мережі.

Дослідити вплив фактичних показників якості електроенергії на струми, втрати, нагрівання, коефіцієнт корисної дії та електромагнітний момент асинхронних двигунів.

Оцінити технічний стан та ефективність наявних фільтрокомпенсувальних пристроїв з урахуванням сучасного складу навантаження і фонових спотворень напруги.

Обґрунтувати доцільність модернізації системи компенсації шляхом застосування переналаштованих пасивних фільтрів, активних або гібридних фільтрів, статичних генераторів реактивної потужності чи SVC.

Розробити рекомендації щодо нормалізації показників якості електричної енергії, зменшення втрат та підвищення надійності електропостачання копрового цеху.

1 АНАЛІЗ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УМОВАХ ПрАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

1.1 Теоретичні відомості про показники якості електричної енергії

Під якістю електричної енергії розуміють сукупність характеристик напруги електропостачання, за яких забезпечується нормальна, надійна та енергоефективна робота електроприймачів відповідно до їхнього функціонального призначення. Підтримання належного рівня якості електроенергії є одним із ключових завдань сучасної електроенергетики, оскільки відхилення параметрів напруги від установлених значень можуть спричиняти додаткові втрати потужності, перегрівання електрообладнання, порушення технологічних процесів і скорочення строку його експлуатації.

Електрична енергія має особливу природу, оскільки процеси її виробництва, передавання, розподілу та споживання відбуваються практично одночасно. Тому фактичні показники якості електроенергії визначаються не лише режимами роботи генерувального та мережевого обладнання, але й характеристиками електроприймачів споживачів. Потужні нелінійні, несиметричні та різкозмінні навантаження можуть спричиняти спотворення форми напруги, коливання її рівня, несиметрію трифазної системи та появу вищих гармонійних складових.

Унаслідок відмінностей у складі й режимах роботи електричного навантаження характеристики напруги можуть бути неоднаковими в різних точках однієї системи електропостачання. Порушення, створені окремим потужним електроприймачем, здатні поширюватися через електричну мережу та впливати на роботу інших споживачів, приєднаних до тієї самої системи шин або спільної точки приєднання. Саме тому оцінювання якості електричної енергії необхідно проводити безпосередньо в характерних точках мережі, зокрема на межі балансової належності та на затискачах відповідальних електроприймачів.

Електрообладнання та системи електропостачання проєктуються з урахуванням установлених характеристик напруги. Тому вимоги до якості електричної енергії, методів її контролю та оброблення результатів вимірювання визначаються відповідними нормативними документами.

Станом на 2025 рік замість застарілого посилання на ГОСТ 13109-97 доцільно використовувати ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності», ідентичний європейському стандарту EN 50160:2022. Стандарт є чинним в Україні з 8 грудня 2023 року та встановлює характеристики напруги в електричних мережах низької, середньої, високої та надвисокої напруги.

Відповідно до ДСТУ EN 50160:2023 якість напруги електропостачання характеризується такими основними параметрами:

- ✓ частотою напруги;
- ✓ рівнем та відхиленням напруги;
- ✓ швидкими змінами й коливаннями напруги;
- ✓ флікером;
- ✓ провалами та підвищеннями напруги;
- ✓ короткочасними та тривалими перериваннями електропостачання;
- ✓ тимчасовими і перехідними перенапругами;
- ✓ несиметрією трифазної системи напруг;
- ✓ гармонійними та інтергармонійними складовими;
- ✓ сумарним коефіцієнтом гармонійного спотворення напруги.

Для мереж низької напруги стандарт, зокрема, передбачає, що протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень напруги, усереднених за 10 хвилин, повинні перебувати в межах ±10 % номінальної напруги. Для номінального значення 230 В це відповідає діапазону від 207 до 253 В.

Показники якості електричної енергії мають важливе технічне й економічне значення, оскільки характеризують взаємний вплив електричної мережі та споживача, зокрема ПрАТ «Дніпроспецсталь». Перевищення

допустимих рівнів несиметрії, гармонійних спотворень, коливань або відхилень напруги призводить до збільшення втрат електричної енергії, погіршення коефіцієнта потужності, перегрівання трансформаторів і електродвигунів, виникнення вібрацій, зниження продуктивності технологічного обладнання та скорочення ресурсу ізоляції.

Допустимі характеристики напруги залежать від класу напруги мережі та умов її експлуатації. Їхні нормативні значення встановлюються з урахуванням технічної можливості підтримання відповідних параметрів і економічної доцільності заходів із нормалізації якості електропостачання.

Методи організації вимірювань, визначення показників якості електроенергії, усереднення результатів та класи точності засобів контролю регламентуються ДСТУ EN 61000-4-30:2022 «Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Методи вимірювання якості електроенергії». Цей стандарт є чинним в Україні з 31 грудня 2023 року та застосовується разом із ДСТУ EN 50160:2023 під час проведення інструментального контролю якості напруги.

Отже, для дослідження системи електропостачання ПрАТ «Дніпроспецсталь» необхідно оцінювати фактичні характеристики напруги відповідно до ДСТУ EN 50160:2023, а вимірювання й оброблення отриманих результатів здійснювати згідно з вимогами ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Використання цих стандартів забезпечує відповідність дослідження нормативній базі України, актуальній у 2024–2025 роках.

1.2 Законодавчі вимоги щодо управління якістю електроенергії

Нормування показників якості електричної енергії є одним із ключових завдань у сфері забезпечення надійного та ефективного електропостачання. Система показників якості електроенергії охоплює кількісні характеристики

повільних змін напруги, до яких належать її усталені відхилення, а також швидких змін, що проявляються у вигляді коливань. Крім того, оцінюються форма кривої напруги, симетрія напруг у трифазній системі та стабільність частоти електричної мережі.

Працівники енергетичної служби підприємства практично не мають можливості впливати на частоту в зовнішній електромережі. Винятком є випадки, коли електропостачання здійснюється від автономного джерела, не пов'язаного з централізованою енергосистемою. Тому основну увагу доцільно приділити показникам якості електроенергії за напругою на межі балансової належності електричних мереж ПрАТ «Дніпроспецсталь».

Нормування показників якості напруги ґрунтується на технічних та економічних вимогах. Під час проєктування, реконструкції або модернізації систем електропостачання необхідно визначати фактичні показники якості електроенергії, обґрунтовано обирати способи їх покращення та відповідне технічне обладнання, а також правильно визначати місця його встановлення. Реалізація таких заходів сприяє зниженню втрат електричної енергії, підвищенню надійності роботи електрообладнання, стабільності технологічних процесів і забезпеченню відповідності показників якості електроенергії встановленим нормативним вимогам на межі балансової належності підприємства та енергосистеми.

. Відповідно до ДСТУ EN 50160:2023 ПЯЕ є:

- стале відхилення напруги δUy;
- розмах зміни напруги δUt;
- доза ФлікераPt;
- коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої напруги Ku;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової кривої напруги $Ku\ (n)$;
- коефіцієнт несиметрії напруги по зворотній послідовності K_{2U};
- коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовності K_{0U};
- відхилення частоти Δf;
- тривалість провалу напруги U_{mn};

- імпульсна напруга $U_{імп}$;
- коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{перU}$.

1.3 Вимоги до якості електричної енергії на підприємстві

У нормальних умовах експлуатації електричної мережі показники якості електричної енергії мають відповідати вимогам ДСТУ EN 50160:2023. Для електричних мереж низької та середньої напруги протягом кожного тижневого періоду не менше 95 % усереднених за 10 хвилин діючих значень напруги повинні перебувати в межах ±10 % від номінальної напруги. Усі усереднені за 10 хвилин значення напруги мають залишатися в діапазоні від мінус 15 % до плюс 10 % від номінального значення.

Відповідність показників якості електроенергії визначають у точці приєднання електроустановок споживача до електричної мережі. Для мереж високої напруги допустимі межі зміни напруги можуть установлюватися оператором системи та споживачем у договорі про приєднання або надання послуг з розподілу чи передачі електричної енергії.

Під час аварій, значних пошкоджень електричної мережі, дії стихійних явищ, дефіциту потужності, виконання невідкладних ремонтних робіт та інших виняткових обставин можливі короткочасні відхилення параметрів напруги і частоти від установлених значень. Такі режими не належать до нормальних умов експлуатації, тому вимоги стандарту щодо тривалого забезпечення нормованих характеристик напруги до них безпосередньо не застосовують. Після ліквідації аварійної ситуації параметри електропостачання повинні бути відновлені до значень, установлених для нормального режиму роботи мережі.

Для електроприймачів, які створюють гармонічні спотворення, коливання напруги, несиметрію або інші електромагнітні завади, допустимі рівні емісії визначаються технічними умовами приєднання, договором з оператором

системи та вимогами електромагнітної сумісності. Робота такого обладнання не повинна спричиняти перевищення нормативних показників якості електроенергії в точці загального приєднання та негативно впливати на функціонування інших електроустановок підприємства і споживачів електричної мережі.

1.4 Стандарти якості електроенергії на підприємстві

Якість електричної енергії є одним із визначальних чинників надійної, безпечної та енергоефективної роботи промислового підприємства. Для металургійного виробництва це питання має особливе значення, оскільки до системи електропостачання підключено значну кількість потужних електроприймачів із нелінійними, несиметричними та різкозмінними характеристиками навантаження. До них належать електричні печі, випрямлячі, частотні перетворювачі, прокатні електроприводи, зварювальні установки, компресори, насоси, вентилятори та підіймально-транспортне обладнання.

Станом на 2025 рік основним нормативним документом, за яким в Україні оцінюють характеристики напруги в точках приєднання споживачів до електричних мереж загального призначення, є ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності», ідентичний європейському стандарту EN 50160:2022. Цей стандарт набув чинності 8 грудня 2023 року. Попередню редакцію ДСТУ EN 50160:2014 та зміни до неї було скасовано з 1 березня 2024 року. Тому в роботах, що виконуються у 2024–2025 роках, замість посилання на застарілі вимоги ГОСТ 13109-97 доцільно застосовувати положення ДСТУ EN 50160:2023.

Кодекс систем розподілу передбачає, що за нормальних умов експлуатації параметри якості електричної енергії в точці приєднання споживача повинні відповідати ДСТУ EN 50160:2023. При цьому стандарт характеризує передусім

напругу, яку оператор системи розподілу передає споживачеві на межі балансової належності. Він не встановлює безпосередньо допустимі рівні струмових спотворень, створених окремим електроприймачем, і не замінює технічні вимоги до внутрішньої мережі підприємства.

Для внутрішніх промислових мереж додатковим орієнтиром може бути міжнародний стандарт IEC 61000-2-4:2024, який установлює рівні електромагнітної сумісності в системах електропостачання промислових об’єктів із номінальною напругою до 35 кВ і частотою 50 або 60 Гц. Його положення застосовують у внутрішніх точках приєднання підприємства, зокрема на секціях шин 6 і 10 кВ, від яких отримують живлення потужні технологічні установки. Стандарт розглядає відхилення напруги, несиметрію, провали, короткочасні переривання, гармоніки до 40-го порядку, інтергармоніки, складові напруги в діапазоні до 150 кГц і перехідні перенапруги.

Одним з основних показників якості електроенергії є частота напруги. Для електричної системи, синхронно приєднаної до об’єднаної енергосистеми України, її номінальне значення становить 50 Гц. Протягом не менше ніж 99,5 % часу за рік середнє значення частоти повинно перебувати в межах від 49,5 до 50,5 Гц. Протягом 100 % часу нормальних умов роботи допускається ширший діапазон — від 47 до 52 Гц.

Для ПрАТ «Дніпроспецсталь» відхилення частоти переважно визначається режимом роботи об’єднаної енергосистеми, а не окремими електроприймачами підприємства. Водночас значне зниження частоти може призводити до зменшення швидкості обертання нерегульованих електродвигунів, зниження продуктивності насосів і вентиляторів, збільшення струмів та нагрівання електричних машин. Підвищення частоти також змінює режими роботи електроприводів, трансформаторів, систем автоматики й електронного обладнання.

Важливим параметром є усталене значення напруги. Для низьковольтних мереж протягом кожного тижневого періоду не менше 95 % середньоквадратичних значень напруги, усереднених за 10 хвилин, повинні

перебувати в межах ±10 % від номінального значення. Для фазної напруги 230 В допустимий діапазон становить від 207 до 253 В. Для лінійної напруги 400 В відповідний робочий діапазон становить від 360 до 440 В.

Для мережі підприємства з номінальною напругою 10 кВ відхилення в межах ±10 % відповідає діапазону від 9 до 11 кВ. Для мережі 6 кВ аналогічний діапазон становить від 5,4 до 6,6 кВ. Під час оцінювання фактичних параметрів на межі балансової належності необхідно враховувати клас напруги, заявлену напругу, умови договору з оператором системи розподілу та положення розділу ДСТУ EN 50160:2023, що стосується мереж середньої напруги.

Тижневий період контролю включає 1008 послідовних десятихвилинних інтервалів. Отже, щонайменше 958 усереднених значень повинні відповідати встановленому діапазону. Вихід за межі ±10 % допускається не більше ніж приблизно для 50 десятихвилинних значень протягом тижня, якщо ці відхилення не пов’язані з перервами в електропостачанні або іншими винятковими умовами.

Зниження напруги на затискачах асинхронного двигуна призводить до зменшення електромагнітного моменту та збільшення струму за незмінного механічного навантаження. У результаті двигун може перегріватися, а тривалість його розгону збільшується. Підвищена напруга спричиняє зростання магнітного потоку, втрат у сталі, реактивної потужності та температури магнітопроводу. Тому навіть перебування напруги поблизу нормативної межі протягом тривалого часу може негативно позначатися на енергоефективності технологічного обладнання.

Окремим показником є флікер — суб’єктивно помітне мерехтіння освітлення, спричинене швидкими коливаннями напруги. Довготривалий показник флікера повинен бути не більшим за 1 протягом не менше ніж 95 % часу тижневого спостереження. Для металургійних підприємств основними джерелами флікера можуть бути дугові печі, потужні електроприводи з різкозмінним навантаженням, зварювальне обладнання та часті комутації великих споживачів.

Для ПрАТ «Дніпроспецсталь» контроль флікера доцільно проводити на секціях шин, до яких підключено електротермічне обладнання, перетворювальні агрегати та потужні двигуни. Перевищення встановленого значення може свідчити про недостатню потужність короткого замикання мережі, значні коливання реактивної потужності або неефективну роботу компенсаційного обладнання.

Особливе значення для трифазних електроприводів має несиметрія напруги. Протягом кожного тижневого періоду 95 % десятихвилинних значень складової напруги зворотної послідовності не повинні перевищувати 2 % від складової прямої послідовності. У промислових мережах із великою кількістю однофазних навантажень можуть виникати значення, близькі до 3 %, однак такий рівень уже становить небезпеку для тривалої роботи потужних асинхронних двигунів.

Несиметрія напруги на рівні 2 % не означає, що фазні струми двигуна також відрізнятимуться лише на 2 %. Через малий опір двигуна струмам зворотної послідовності фактична несиметрія струмів може бути в декілька разів більшою. Це призводить до додаткових втрат у роторі та статорі, локального перегрівання обмоток, зменшення корисного моменту, посилення вібрацій і скорочення строку служби ізоляції. Тому для шин, від яких живляться відповідальні асинхронні двигуни, на підприємстві доцільно встановлювати попереджувальний внутрішній рівень нижче нормативної межі 2 %.

Важливою складовою оцінювання якості електроенергії є контроль несинусоїдальності напруги. Нелінійні електроприймачі споживають струм несинусоїдальної форми, унаслідок чого на опорах трансформаторів, кабелів і шин виникають гармонійні складові напруги. Найхарактернішими джерелами вищих гармонік на металургійному підприємстві є тиристорні та діодні випрямлячі, частотні перетворювачі, дугові електропечі, джерела безперебійного живлення та імпульсні блоки живлення.

Протягом не менше ніж 95 % часу тижневого спостереження десятихвилинні значення окремих гармонік не повинні перевищувати

встановлених рівнів. Для п’ятої гармоніки граничне значення становить 6 %, для сьомої — 5 %, для одинадцятої — 3,5 %, для тринадцятої — 3 %, для сімнадцятої — 2 %, а для дев’ятнадцятої, двадцять третьої та двадцять п’ятої гармонік — по 1,5 %.

Для гармонік, кратних трьом, допустиме значення третьої гармоніки становить 5 %, дев’ятої — 1,5 %, п’ятнадцятої та двадцять першої — по 0,5 %. Для парних гармонік значення другої гармоніки обмежується рівнем 2 %, четвертої — 1 %, а парних складових від шостої до двадцять четвертої — рівнем 0,5 %. Сумарний коефіцієнт гармонійного спотворення напруги з урахуванням гармонік до 40-го порядку включно не повинен перевищувати 8 %.

Для електричної мережі ПрАТ «Дніпроспецсталь» особливу увагу необхідно приділяти п’ятій, сьомій, одинадцятій і тринадцятій гармонікам, характерним для шестипульсних і дванадцятипульсних перетворювальних схем. Підвищений рівень цих складових може спричиняти перевантаження трансформаторів і кабельних ліній, збільшення втрат активної потужності, нагрівання конденсаторних установок, похибки засобів обліку та порушення роботи релейного захисту й автоматики.

Наявність конденсаторних батарей і фільтрокомпенсувальних пристроїв потребує особливо ретельного контролю гармонійного складу. Ємність конденсаторів разом з індуктивністю трансформаторів і мережі може створювати резонансні умови. У такому режимі навіть відносно невеликий гармонійний струм здатний спричинити значне підвищення напруги відповідної гармоніки, перевантаження конденсаторів і пошкодження комутаційного обладнання.

Крім тривалих відхилень, стандарт передбачає реєстрацію короткочасних подій: провалів, підвищень напруги, коротких і тривалих переривань, а також перехідних перенапруг. Для цих явищ важливо визначати не лише їх кількість, але й залишкову напругу, максимальну напругу та тривалість кожної події. Провали напруги найчастіше виникають під час коротких замикань, прямих

пусків потужних двигунів, повторного самозапуску групи електроприводів і ввімкнення трансформаторів.

Для промислового підприємства навіть провал тривалістю декілька десятих секунди може призвести до вимкнення контакторів, зупинки частотних перетворювачів, перезапуску програмованих контролерів або порушення безперервного технологічного процесу. Тому відповідність середніх значень напруги вимогам стандарту ще не гарантує повної технологічної стійкості виробництва. Необхідно окремо аналізувати короткочасні події та зіставляти їх із моментами аварійних зупинок обладнання.

Вимірювання показників якості електричної енергії повинні виконуватися відповідно до методів серії стандартів IEC 61000-4-30. Кодекс систем розподілу посилається на ДСТУ IEC 61000-4-30:2010. Для перевірки відповідності рівня напруги вимірювання проводять протягом не менше ніж семи календарних днів, а результати повинні містити значення, усереднені на кожному десятихвилинному інтервалі. Засоби вимірювання мають пройти встановлені процедури оцінювання відповідності та метрологічного контролю.

На підприємстві вимірювання доцільно здійснювати як на межі балансової належності з оператором системи розподілу, так і у внутрішніх характерних точках. До таких точок належать секції шин 10 кВ, вводи головних понижувальних підстанцій, шини трансформаторних підстанцій 10/0,4 кВ, вузли живлення потужних перетворювачів, електричних печей та асинхронних двигунів. Це дає змогу розмежувати спотворення, що надходять із зовнішньої мережі, і порушення, створені обладнанням самого підприємства.

Для об’єктивного оцінювання доцільно одночасно реєструвати напруги, струми, активну, реактивну та повну потужності, коефіцієнт потужності, частоту, несиметрію, флікер, окремі гармоніки, сумарні гармонійні спотворення, провали, підвищення й переривання напруги. Тривалість вимірювання повинна охоплювати робочі та вихідні дні, години максимального і мінімального навантаження, пуски потужних двигунів, роботу електротермічних установок та перемикання фільтрокомпенсувальних пристроїв.

Підприємство має право встановлювати внутрішні вимоги, жорсткіші за загальні нормативні значення. Це доцільно для секцій, від яких живляться відповідальні електроприводи, автоматизовані системи керування, комп’ютерне обладнання й технологічні установки безперервної дії. Внутрішні попереджувальні рівні можуть застосовуватися для своєчасного виявлення тенденції до погіршення якості електроенергії до того, як буде перевищено граничне значення стандарту.

Таким чином, забезпечення якості електричної енергії на ПрАТ «Дніпроспецсталь» повинно базуватися на поєднанні вимог ДСТУ EN 50160:2023 у точці приєднання до системи розподілу, методів вимірювання ДСТУ IEC 61000-4-30 та спеціальних вимог до електромагнітної сумісності внутрішньої промислової мережі. Постійний або періодичний контроль напруги, несиметрії, флікера, гармонійних складових і короткочасних подій дає змогу своєчасно виявляти небезпечні режими, оцінювати ефективність фільтрокомпенсувальних пристроїв, зменшувати втрати електроенергії та підвищувати надійність роботи технологічного обладнання.

1.5 Організаційні заходи щодо вимірювання показників якості на підприємстві

Забезпечення належної якості електричної енергії на промисловому підприємстві потребує не лише застосування сучасних технічних засобів, а й правильної організації процесу вимірювання, контролю та аналізу відповідних показників. Вимірювання якості електроенергії повинно здійснюватися систематично, за попередньо розробленою програмою та з урахуванням структури системи електропостачання, режимів роботи технологічного обладнання і характеру електричних навантажень.

Станом на 2025 рік оцінювання характеристик напруги в електричних мережах загального призначення здійснюється відповідно до ДСТУ EN 50160:2023, українська редакція якого набула чинності 1 березня 2025 року. Цей стандарт визначає характеристики напруги, які повинні забезпечуватися в точках приєднання споживачів за нормальних умов експлуатації електричної мережі. Методи організації та проведення вимірювань установлюються ДСТУ EN 61000-4-30:2022, що регламентує порядок вимірювання, часової агрегації та реєстрації показників якості електричної енергії.

На підприємстві організація контролю якості електроенергії повинна бути покладена на енергетичну службу або інший структурний підрозділ, відповідальний за експлуатацію системи електропостачання. Розпорядчим документом керівника підприємства доцільно призначити відповідальних осіб, визначити їхні повноваження, установити періодичність контролю та затвердити перелік контрольованих параметрів. У цьому документі також необхідно передбачити порядок встановлення вимірювального обладнання, збереження отриманих даних, підготовки звітів і прийняття рішень у разі виявлення відхилень.

Основою організації вимірювань є розроблення програми контролю показників якості електроенергії. Така програма повинна враховувати схему зовнішнього та внутрішнього електропостачання підприємства, кількість трансформаторних підстанцій, рівні напруги, розміщення основних електроприймачів, характер виробничого процесу та можливі джерела електромагнітних завад. Програма має визначати мету вимірювань, контрольні точки, тривалість спостереження, перелік застосовуваних приладів, порядок опрацювання результатів і критерії оцінювання відповідності.

Першочерговою точкою контролю є межа балансової належності між електричними мережами підприємства та оператором системи розподілу. Вимірювання в цій точці дає змогу визначити якість електроенергії, яка надходить із зовнішньої мережі, та відокремити зовнішні причини погіршення показників від порушень, що виникають безпосередньо в системі

електропостачання підприємства. Отримані результати можуть використовуватися під час взаємодії з оператором системи розподілу, розгляду звернень і встановлення причин пошкодження або нестійкої роботи електрообладнання.

Додаткові точки вимірювання необхідно передбачати на шинах головних понижувальних підстанцій, розподільчих пунктах, секціях шин середньої та низької напруги, а також на вводах найбільш потужних цехових підстанцій. Такий підхід дозволяє простежити зміну параметрів електричної енергії під час її розподілу територією підприємства та визначити ділянки, на яких виникають найбільші відхилення напруги, несиметрія або гармонічні спотворення.

Особливу увагу необхідно приділяти приєднанням потужного технологічного обладнання зі швидкозмінним або нелінійним навантаженням. До такого обладнання належать електродугові печі, зварювальні установки, випрямлячі, перетворювачі частоти, електроприводи великої потужності, прокатні стани, підйомні механізми та інші установки, робота яких супроводжується різкими змінами струму. Вимірювання на їхніх вводах дозволяє визначити внесок окремих електроприймачів у формування коливань напруги, флікера, несиметрії та гармонічних складових.

Контроль також доцільно організовувати біля електроприймачів, особливо чутливих до погіршення якості електроенергії. До них належать системи автоматизації, мікропроцесорні пристрої, засоби релейного захисту, інформаційні системи, програмовані контролери, вимірювальні комплекси та відповідальні електроприводи. Навіть короткочасні провали або переривання напруги можуть викликати зупинення такого обладнання, втрату технологічної інформації або порушення послідовності виробничих операцій.

На підприємстві доцільно поєднувати постійний та періодичний контроль. Постійний моніторинг здійснюється за допомогою стаціонарних аналізаторів, установлених у найбільш важливих точках електричної мережі. Такі прилади безперервно реєструють параметри електроенергії, фіксують порушення та передають інформацію до автоматизованої системи контролю. Періодичні

вимірювання виконуються переносними аналізаторами під час планового енергетичного обстеження, введення в експлуатацію нового обладнання, реконструкції мережі, виникнення аварій або надходження скарг від виробничих підрозділів.

Для оцінювання відповідності характеристик напруги вимогам ДСТУ EN 50160:2023 доцільно проводити безперервну реєстрацію протягом повного тижневого циклу роботи підприємства. Такий період дозволяє охопити зміни навантаження в робочі та неробочі дні, денні й нічні зміни, пускові режими, технологічні паузи та максимуми електроспоживання. Якщо виробничий цикл має більшу тривалість або суттєво змінюється залежно від виду продукції, період спостереження необхідно відповідно збільшувати.

Під час вимірювань повинні реєструватися частота мережі, діючі значення фазних і міжфазних напруг, усталені відхилення напруги, швидкі зміни напруги, провали, перенапруги та переривання електропостачання. Крім того, контролюються несиметрія трифазної системи, гармонічні та інтергармонічні складові, сумарне гармонічне спотворення і показники флікера. Для внутрішнього енергетичного аналізу додатково можуть реєструватися фазні струми, активна, реактивна і повна потужність, коефіцієнт потужності та характер зміни навантаження.

Методи вимірювання гармонік та інтергармонік мають відповідати положенням стандартів серії IEC 61000-4-7, а вимірювання флікера повинно здійснюватися приладами, побудованими відповідно до ДСТУ EN 61000-4-15:2018. Застосування єдиних стандартизованих методів забезпечує порівнянність результатів, отриманих у різних точках мережі та в різні періоди роботи підприємства.

Для офіційного підтвердження відповідності показників якості електроенергії, розгляду спірних ситуацій та визначення відповідальності сторін доцільно застосовувати аналізатори класу A відповідно до ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Такі прилади забезпечують стандартизовані методи вимірювання, синхронізацію та підвищену точність результатів. Прилади класу S можуть

використовуватися для внутрішнього моніторингу, діагностики та попереднього виявлення проблем у системі електропостачання. Функційні випробування вимірювальних приладів та оцінювання їхньої невизначеності регламентуються ДСТУ EN 62586-2:2018.

Перед початком вимірювань необхідно перевірити технічний стан аналізатора, чинність його калібрування, правильність налаштування номінальної напруги, коефіцієнтів трансформації вимірювальних трансформаторів та часової синхронізації. Особливого значення набуває правильність підключення фазних провідників і струмових кліщів, оскільки помилки підключення можуть призвести до неправильного визначення несиметрії, напрямку потужності та фазових співвідношень.

Часові параметри всіх стаціонарних і переносних приладів повинні бути узгоджені. Синхронізація дає можливість зіставляти події, зареєстровані в різних точках електричної мережі, та визначати напрямок поширення порушення. Наприклад, якщо провал напруги одночасно зареєстрований на межі балансової належності та на внутрішніх підстанціях, його причину можна пов’язувати із зовнішньою мережею. Якщо ж порушення спочатку з’являється біля конкретного технологічного агрегату, це свідчить про внутрішнє походження події.

Паралельно з автоматичною реєстрацією електричних параметрів необхідно вести журнал технологічних подій. У ньому зазначають час увімкнення і вимкнення потужного обладнання, пусків електродвигунів, роботи електродугових печей, перемикання трансформаторів, спрацювання захистів, аварійних зупинень і виконання ремонтних робіт. Порівняння електричних та технологічних даних дозволяє встановити зв’язок між конкретною виробничою операцією і погіршенням показників якості електроенергії.

Результати вимірювань повинні зберігатися в електронній базі даних із зазначенням місця встановлення приладу, періоду спостереження, типу обладнання, налаштувань і режиму роботи підприємства. Необхідно забезпечити захист інформації від випадкового видалення або несанкціонованого

редагування. Доцільно зберігати не лише підсумкові звіти, а й первинні файли вимірювань, оскільки вони можуть знадобитися для повторного аналізу або порівняння з результатами наступних обстежень.

Після завершення вимірювальної кампанії енергетична служба виконує перевірку повноти даних, вилучає інтервали з неправильним підключенням або технічними збоями та проводить статистичне опрацювання результатів. Визначається тривалість перебування кожного показника в нормативних межах, кількість і тривалість порушень, максимальні зареєстровані значення та час їх виникнення. Результати доцільно подавати у вигляді добових і тижневих графіків, таблиць, діаграм та переліку найбільш значних подій.

У разі виявлення відхилень необхідно визначити їхнє джерело та розробити відповідні коригувальні заходи. Залежно від характеру проблеми можуть бути передбачені зміна схеми живлення, перерозподіл навантаження між трансформаторами, регулювання напруги, компенсація реактивної потужності, встановлення фільтрів гармонік, симетрування фазних навантажень або зміна режиму роботи потужних електроприймачів. Після реалізації заходів потрібно провести повторні вимірювання та підтвердити досягнення необхідного результату.

Вимірювання в діючих електроустановках повинні виконуватися кваліфікованими працівниками з відповідною групою з електробезпеки. Підключення аналізаторів необхідно здійснювати з дотриманням правил безпечної експлуатації електроустановок, застосуванням справних засобів індивідуального захисту та вимірювальних проводів, розрахованих на відповідну категорію перенапруги. Місце встановлення приладу повинно бути захищене від випадкового дотику, механічного пошкодження, вологи, високої температури та впливу виробничого пилу.

Таким чином, організація вимірювання показників якості електричної енергії на підприємстві повинна мати системний і безперервний характер. Вона охоплює визначення відповідальних осіб, вибір контрольних точок, застосування стандартизованих приладів, планування тривалості спостереження,

фіксацію технологічних подій, аналіз результатів та реалізацію коригувальних заходів. Належним чином організований моніторинг дозволяє своєчасно виявляти негативні зміни в системі електропостачання, зменшувати втрати електроенергії, підвищувати надійність обладнання та забезпечувати стабільність технологічних процесів.

1.6 Вибір точок вимірювання та контроль якості електричної енергії

Вимоги до якості електричної енергії на підприємстві визначаються відповідно до ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». Положення цього стандарту застосовуються насамперед до точок електропостачання, у яких електричні мережі оператора системи розподілу з’єднуються з електроустановками споживача. Саме в цих точках оцінюють характеристики напруги та встановлюють відповідність фактичних параметрів електропостачання нормативним вимогам.

Для промислового підприємства основною точкою контролю, як правило, є межа балансової належності та експлуатаційної відповідальності між оператором системи розподілу і споживачем. Розташування цієї межі, параметри електропостачання, порядок проведення вимірювань і відповідальність сторін визначаються договором про надання послуг з розподілу електричної енергії та відповідними технічними документами. За погодженням між оператором системи розподілу та підприємством контроль якості електричної енергії може здійснюватися також в інших точках мережі, якщо це необхідно для визначення джерела порушень або оцінювання умов роботи окремих груп електрообладнання.

Вибір характерних точок контролю повинен забезпечувати отримання об’єктивної інформації про стан електропостачання як на вводах підприємства,

так і в його внутрішніх мережах. При цьому враховують структуру системи електропостачання, схему розподілу навантаження, потужність трансформаторів, режими роботи технологічного обладнання, наявність нелінійних і різкозмінних споживачів, а також можливий вплив окремих електроустановок на характеристики напруги.

Для контролю показників якості електричної енергії на ПрАТ «Дніпроспецсталь» доцільно використовувати характерні точки вимірювання на вводах напругою 10 кВ, які відповідають межам балансової належності електричних мереж підприємства. До таких точок належать Т11, Т12, Т13, Т14, Т15, Т16, Т17, Т18, Т19 і Т110. Результати вимірювань у зазначених точках дають змогу оцінити якість електропостачання підприємства, визначити характер відхилень і встановити, на якій ділянці електричної мережі виникають порушення.

Додаткові точки контролю можуть бути організовані на шинах головних знижувальних підстанцій, розподільчих підстанцій, трансформаторів і безпосередньо біля найбільш потужних або чутливих електроприймачів. Особливу увагу необхідно приділяти ділянкам, на яких працюють дугові сталеплавильні печі, електроприводи великої потужності, перетворювальні установки, зварювальне обладнання та інші споживачі, здатні спричиняти коливання напруги, несиметрію, появу вищих гармонік і короткочасні зміни параметрів електропостачання.

Контроль якості електричної енергії проводиться з метою перевірки відповідності фактичних характеристик напруги вимогам ДСТУ EN 50160:2023, умовам договору та внутрішнім технічним вимогам підприємства. Під час контролю оцінюють частоту напруги, її усталені відхилення, швидкі зміни та коливання, несиметрію трифазної системи, гармонічні й інтергармонічні складові, провали та перенапруги, короткочасні й тривалі переривання електропостачання, а також інші події, які можуть впливати на роботу технологічного обладнання.

У разі виявлення невідповідності фактичних показників установленим вимогам проводиться технічний аналіз причин порушення. Під час такого аналізу визначається, чи виникло відхилення в зовнішній мережі оператора системи розподілу, у внутрішній системі електропостачання підприємства або внаслідок роботи окремих технологічних електроустановок. Для цього порівнюють результати одночасних вимірювань у декількох точках, аналізують режими роботи обладнання, графіки електричного навантаження, комутаційні операції та зареєстровані аварійні події.

За результатами контролю розробляються організаційні й технічні заходи, спрямовані на нормалізацію характеристик напруги. До таких заходів можуть належати оптимізація режимів роботи трансформаторів, рівномірний розподіл навантаження між фазами та секціями шин, застосування пристроїв компенсації реактивної потужності, встановлення фільтрокомпенсувальних або активних фільтрувальних пристроїв, модернізація систем регулювання електроприводів, зміна режимів увімкнення потужних споживачів і вдосконалення схем електропостачання.

Результати вимірювань також використовуються для перевірки відповідності проєктних розрахунків реальним експлуатаційним режимам. На їх основі уточнюються параметри електричних мереж, визначаються фактичні рівні навантаження, оцінюється ефективність установлених засобів компенсації та фільтрації, а також обґрунтовується необхідність модернізації електротехнічного обладнання.

Контроль показників якості електричної енергії на підприємстві може здійснюватися безперервно, періодично або під час спеціально організованих обстежень. Безперервний контроль доцільно застосовувати на основних вводах підприємства та в точках живлення найбільш відповідального технологічного обладнання. Періодичні вимірювання проводяться відповідно до затвердженого графіка, а спеціальні обстеження організовуються після виникнення аварій, скарг на роботу обладнання, зміни схеми електропостачання, введення нових потужних споживачів або проведення реконструкції електричних мереж.

Для проведення вимірювань необхідно використовувати спеціалізовані аналізатори якості електричної енергії, здатні реєструвати характеристики напруги та струму протягом установленого періоду спостереження. Вимірювальні прилади повинні мати належні метрологічні характеристики, проходити періодичну повірку або калібрування та забезпечувати збереження результатів для подальшого аналізу. Отримані дані оформлюються у вигляді протоколів, графіків, журналів подій і технічних звітів, які використовуються для оцінювання стану системи електропостачання та прийняття рішень щодо підвищення її надійності й енергоефективності.

1.7 Засоби вимірювання показників якості електроенергії

Для дослідження показників якості електричної енергії в системі електропостачання ПрАТ «Дніпроспецсталь» використовувався реєстратор ПАРМА РК 3.01. Цей прилад призначений для вимірювання, тривалої реєстрації та статистичного опрацювання параметрів напруги в однофазних і трифазних електричних мережах промислових підприємств. Реєстратор може застосовуватися як переносний вимірювальний засіб під час проведення енергетичних обстежень або як стаціонарний пристрій для контролю визначеної точки електричної мережі. ПАРМА РК 3.01 розроблявся для оцінювання відповідності електроенергії вимогам ГОСТ 13109-97 і формування відповідного автоматичного протоколу.

Станом на 2025 рік ГОСТ 13109-97 не повинен використовуватися як основний нормативний документ для оцінювання якості електропостачання в Україні. Характеристики напруги в точках приєднання до електричних мереж загальної призначеності необхідно оцінювати відповідно до ДСТУ EN 50160:2023. Українськомовній редакції цього стандарту надано чинності з 1 березня 2025 року. Методи проведення вимірювань, часової агрегації значень,

реєстрації подій і позначення недостовірних інтервалів визначаються ДСТУ EN 61000-4-30:2022.

Отже, вбудований у ПАРМА РК 3.01 протокол відповідності ГОСТ 13109-97 у 2025 році може використовуватися лише як додатковий інформаційний матеріал. Він не є автоматичним підтвердженням відповідності сучасному ДСТУ EN 50160:2023. Для актуальної оцінки необхідно зчитувати первинні результати вимірювань із пам’яті реєстратора, виконувати їх часову агрегацію та порівнювати отримані показники з чинними нормативними межами.

Реєстратор ПАРМА РК 3.01 належить до вимірювального обладнання попереднього покоління. Тому перед його застосуванням необхідно перевірити технічний стан конкретного екземпляра, чинність калібрування або метрологічної повірки, працездатність внутрішнього годинника, відповідність коефіцієнтів трансформації та правильність підключення каналів напруги. Для офіційного розгляду спірних питань між підприємством та оператором системи розподілу доцільно використовувати аналізатор, для якого документально підтверджено відповідність методам вимірювання класу А за ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Стандарт передбачає застосування методів класу А і класу S, а вимоги до функціональних випробувань та невизначеності вимірювальних приладів установлюються стандартами серії IEC 62586.

З 1 липня 2025 року в Україні для низьковольтних електричних мереж установлено стандартну номінальну напругу 230/400 В. Для фазної напруги 230 В нормативний діапазон ±10 % становить від 207 до 253 В. Тому під час використання ПАРМА РК 3.01 необхідно враховувати, що в налаштуваннях приладу попереднього покоління могли бути передбачені значення 220 і 380 В. Якщо програмне забезпечення не дозволяє встановити сучасне номінальне значення 230/400 В, автоматичний висновок приладу про відповідність не повинен використовуватися. У такому разі результати необхідно експортувати та опрацьовувати окремо від вбудованого алгоритму.

Підключення ПАРМА РК 3.01 до мережі напругою 0,4 кВ може здійснюватися безпосередньо. У мережах середньої або високої напруги прилад підключається до вторинних кіл вимірювальних трансформаторів напруги. Реєстратор дозволяє вибирати вторинні номінальні напруги 57,74 або 100 В, а також значення, передбачені для прямого підключення до низьковольтної мережі. Під час подальшого опрацювання даних усі значення повинні бути приведені до первинної напруги з урахуванням фактичного коефіцієнта трансформації.

Під час проведення експериментальних досліджень прилад забезпечував вимірювання діючих значень фазних або лінійних напруг. Вид вимірюваної напруги залежав від схеми електричної мережі та способу підключення реєстратора. У трифазній трипровідній мережі контролювалися переважно лінійні напруги (U_AB), (U_BC) та (U_CA), а в чотирипровідній мережі могли реєструватися фазні напруги відносно нейтрального провідника.

Окрім діючих значень напруги, реєстратор визначав діюче значення напруги основної частоти, усталене відхилення напруги, частоту мережі, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги, а також окремі гармонічні складові від другої до сорокової. Додатково вимірювалися коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю та коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю.

Особливе значення для оцінювання роботи асинхронних двигунів має контроль зворотної послідовності. Навіть порівняно невелика несиметрія напруги може спричинити виникнення значних струмів зворотної послідовності у статорних обмотках. У результаті в машині утворюється магнітне поле, напрямок обертання якого протилежний напрямку обертання ротора. Це супроводжується додатковими втратами, нагріванням обмоток, пульсаціями електромагнітного моменту та зниженням енергетичної ефективності приводу.

Реєстратор окремо фіксував події, пов’язані з різкими змінами напруги. До таких подій належали провали, тимчасові перенапруги, переривання електропостачання, вихід вимірюваної величини за робочий діапазон приладу та

повна втрата напруги. Для кожної події записувалися час початку, тривалість і характерне значення напруги. Подієві записи повинні аналізуватися окремо від сталих десятихвилинних показників, оскільки провали та перенапруги належать до випадкових електромагнітних явищ і класифікуються за залишковою напругою та тривалістю. ДСТУ EN 50160:2023 не встановлює єдиної допустимої кількості таких подій для всіх електричних мереж.

Після завершення кожного періоду спостереження результати піддавалися статистичному опрацюванню. Визначалися середні, найбільші та найменші значення параметрів за добу або за весь період реєстрації. Окремо розраховувалася частка часу, протягом якого контрольований показник виходив за встановлені межі. Також формувався перелік аварійних і нестандартних ситуацій із зазначенням часу їх виникнення.

Для приведення результатів до вимог 2025 року хвилинні та короткочасні значення, записані ПАРМА РК 3.01, необхідно об’єднувати в десятихвилинні інтервали. Повний тижневий період містить 1008 десятихвилинних інтервалів. За цими інтервалами визначається частка значень, які відповідають нормативним межам. Дані за періоди переривань, неправильного підключення приладу, порушення синхронізації часу або перевищення його вимірювального діапазону необхідно позначати та розглядати окремо.

Основні паспортні характеристики ПАРМА РК 3.01 наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Паспортні вимірювальні характеристики реєстратора ПАРМА РК 3.01

Величина, що вимірюється	Діапазон вимірювання	Інтервал усереднення, с	Межа допустимої похибки
Діюче значення напруги (U)	від (0,7U_ном) до (1,3U_ном)	60	±0,2 %
Усталене відхилення напруги (\delta U)	від –30 до +30 %	60	±0,2 відсоткового пункту

Діюче значення напруги основної частоти (U_{(1)})	від (0,7U_{ном}) до (1,3U_{ном})	60	±0,2 %
Відхилення напруги основної частоти (\delta U_{(1)})	від –30 до +30 %	60	±0,2 відсоткового пункту
Відхилення частоти (\Delta f)	від –5 до +5 Гц	20	відповідно до паспортних даних приладу
Коефіцієнт несиметрії за зворотною послідовністю (K_{2U})	від 0 до 30 %	3	±0,3 відсоткового пункту
Коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю (K_{0U})	від 0 до 30 %	3	±0,5 відсоткового пункту
Коефіцієнт спотворення кривої напруги (K_U)	від 0 до 30 %	3	за (K_U<1%) — ±0,2 відсоткового пункту
Коефіцієнт окремої гармоніки (K_{U(n)}), (n=2…40)	від 0,05 до 30 %	3	за (K_{U(n)}<1%) — ±0,05 відсоткового пункту
Коефіцієнт тимчасової перенапруги	до 1,3	подієва реєстрація	відповідно до формуляра приладу
Глибина провалу напруги	до 100 %	подієва реєстрація	відповідно до формуляра приладу
Тривалість провалу напруги	від 10 до 59 960 мс	подієва реєстрація	±10 мс за тривалості до 20 с; ±20 мс за більшої тривалості
Тривалість перенапруги	від 40 до 59 960 мс	подієва реєстрація	±10 мс за тривалості до 20 с; ±20 мс за більшої тривалості
Похибка внутрішнього астрономічного часу	—	—	±1 с за добу

Наведені в таблиці характеристики відображають паспортні можливості моделі ПАРМА РК 3.01. Перед проведенням дослідження ці значення необхідно звірити з формуляром конкретного екземпляра приладу, оскільки його модифікація, програмне забезпечення та метрологічні характеристики можуть відрізнятися.

Обробка та передавання результатів вимірювання

Обробка експериментальних даних здійснювалася як внутрішніми алгоритмами реєстратора, так і на персональному комп’ютері за допомогою програмного забезпечення TransData. Програма забезпечувала зчитування інформації з пам’яті приладу, перегляд поточних і накопичених значень,

відображення результатів у табличному та графічному вигляді, а також збереження даних для подальшого аналізу.

Застосування персонального комп’ютера дозволяло зіставляти результати, отримані в різні дні та в різних точках електричної мережі. На графіках можна було визначати періоди найбільших відхилень напруги, виділяти максимальні та мінімальні значення, аналізувати зміну гармонічного складу і встановлювати зв’язок між погіршенням якості електроенергії та режимами роботи технологічного обладнання.

Під час опрацювання результатів особливу увагу необхідно приділяти синхронізації часу. Дані реєстратора доцільно зіставляти з оперативними журналами підприємства, в яких зазначаються моменти ввімкнення електродугових печей, пуски потужних електродвигунів, перемикання трансформаторів, робота перетворювачів частоти, спрацювання захистів і аварійні зупинення обладнання. Такий підхід дозволяє визначити, чи пов’язане порушення із зовнішньою електричною мережею, чи його джерелом є обладнання підприємства.

Збережені дані доцільно архівувати не лише у вигляді підсумкових графіків, а й у первинному форматі реєстратора. Це дозволяє повторно опрацювати інформацію за новими критеріями, перевірити правильність розрахунків та порівняти результати з показаннями сучасного аналізатора.

ПАРМА РК 3.01 обладнаний послідовним інтерфейсом RS-232, через який здійснюється передавання даних на персональний комп’ютер або до відповідного пристрою зв’язку. Можливість використання конкретного логічного протоколу, зокрема Modbus, повинна перевірятися за керівництвом з експлуатації та налаштуваннями конкретної модифікації реєстратора. У сучасній автоматизованій системі моніторингу застосування RS-232 потребує додаткових перетворювачів інтерфейсу або шлюзів зв’язку.

Особливості оцінювання результатів у 2025 році

Під час оцінювання результатів необхідно розмежовувати точку приєднання підприємства до мережі оператора системи розподілу та внутрішні

мережі ПрАТ «Дніпроспецсталь». ДСТУ EN 50160:2023 безпосередньо визначає характеристики напруги на затискачах користувача в електричних мережах загальної призначеності. Внутрішні промислові мережі не належать до основної сфери застосування EN 50160. Для них рівні якості мають установлюватися технічними умовами, вимогами до обладнання, внутрішніми стандартами підприємства та положеннями серії IEC 61000-2-4 щодо електромагнітної обстановки на промислових об’єктах.

На межі балансової належності результати необхідно оцінювати за ДСТУ EN 50160:2023. Усередині підприємства ці самі межі можуть застосовуватися як базовий орієнтир, однак для окремих цехів і відповідального обладнання доцільно встановлювати жорсткіші внутрішні критерії. Наприклад, асинхронні двигуни, системи автоматизації та перетворювачі частоти можуть вимагати меншого рівня несиметрії або гармонічних спотворень, ніж граничні значення, установлені для зовнішньої електричної мережі.

Оновлені критерії оцінювання та характер впливу порушень на асинхронні двигуни наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Вплив показників якості електроенергії на роботу асинхронних двигунів

Показник	Критерій оцінювання, актуальний у 2025 році	Вплив на асинхронний двигун
Відхилення напруги	Протягом тижня не менше 95 % десятихвилинних значень повинні перебувати в межах ±10 % від номінальної напруги; усі десятихвилинні значення — у межах від –15 до +10 %	Зниження напруги зменшує електромагнітний і пусковий моменти, збільшує ковзання та струм двигуна під навантаженням. За зменшення напруги на 10 % момент приблизно зменшується на 19 %
Частота мережі	Для синхронно об’єднаної енергосистеми середнє десятисекундне значення повинно перебувати в межах 49,5–50,5 Гц протягом 99,5 % року	Зміна частоти впливає на синхронну швидкість, ковзання, продуктивність механізму, магнітний потік і тепловий стан двигуна
Несиметрія напруги за зворотною послідовністю (K_2U)	Не більше 2 % для 95 % десятихвилинних значень протягом тижня	Виникає магнітне поле зворотної послідовності, збільшуються струми та втрати в роторі, підвищується температура

		обмоток, з’являються вібрації та пульсації моменту
Несиметрія за нульовою послідовністю (K_0U)	Використовується переважно як діагностичний показник внутрішньої мережі; EN 50160 нормує насамперед зворотну послідовність	Може свідчити про порушення стану нейтралі, нерівномірність фазних навантажень, пошкодження ізоляції або неправильне підключення
Сумарне гармонічне спотворення напруги THD	Не більше 8 % для 95 % десятихвилинних значень протягом тижня	Зростають втрати в сталі та обмотках, нагрівання двигуна, шум і вібрація; знижуються ККД та коефіцієнт потужності
Окремі гармонічні складові	Значення кожної гармоніки порівнюється з окремою межею ДСТУ EN 50160:2023	Гармоніки зворотної послідовності створюють гальмівні моменти, а гармоніки прямої послідовності — додаткові пульсації моменту
Тривалий флікер (P_lt)	Не більше 1 протягом не менше 95 % тижневого періоду	Періодичні коливання напруги викликають коливання струму і моменту, що негативно впливає на стабільність технологічного процесу
Провали напруги	Початок провалу фіксується при зменшенні напруги нижче 90 % номінального значення; події класифікуються за залишковою напругою і тривалістю	Можливе різке зменшення моменту, зупинення двигуна, спрацювання захисту або відключення перетворювача частоти
Перенапруга	Початок події фіксується при перевищенні 110 % номінальної напруги	Зростає магнітний потік, струм намагнічування і нагрівання, прискорюється старіння ізоляції обмоток

Нормативи напруги, частоти, флікера, несиметрії та гармонічного складу наведені відповідно до EN 50160:2022, ідентичного національному ДСТУ EN 50160:2023.

Для низьковольтної мережі нормативні значення окремих гармонічних складових напруги від другої до десятої наведено в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Допустимі значення окремих гармонічних складових напруги

Номер гармоніки	Допустиме значення, % від напруги основної частоти
2	2,0
3	5,0
4	1,0
5	6,0

6	0,5
7	5,0
8	0,5
9	1,5
10	0,5

Не менше 95 % десятихвилинних значень кожної гармонічної складової протягом тижня повинні відповідати встановленим межам. Загальний коефіцієнт гармонічного спотворення визначається з урахуванням гармонік до сорокового порядку і не повинен перевищувати 8 %.

П’ята гармоніка для трифазного асинхронного двигуна утворює поле зворотної послідовності, яке обертається назустріч ротору та створює додатковий гальмівний момент. Сьома гармоніка формує поле прямої послідовності, однак його швидкість відрізняється від швидкості основного поля. Спільна дія гармонік призводить до пульсацій моменту, механічних коливань, збільшення втрат і нагрівання двигуна.

Під час аналізу гармонічного складу необхідно враховувати характер технологічного навантаження ПрАТ «Дніпроспецсталь». Основними можливими джерелами спотворень є електродугові печі, випрямлячі, перетворювачі частоти, зварювальні установки, тиристорні регулятори та інші нелінійні електроприймачі. Тому вимірювання доцільно виконувати не лише на межі балансової належності, а й на шинах підстанцій та вводах обладнання, яке може створювати найбільші електромагнітні завади.

Таким чином, ПАРМА РК 3.01 може використовуватися у 2025 році для навчальних, дослідницьких та внутрішніх діагностичних вимірювань за умови його технічної справності та чинного метрологічного підтвердження. Водночас вбудований алгоритм оцінювання за ГОСТ 13109-97 необхідно замінити зовнішнім опрацюванням результатів відповідно до ДСТУ EN 50160:2023 і ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Для постійного автоматизованого моніторингу та офіційного підтвердження відповідності доцільно передбачити модернізацію системи із застосуванням сучасних аналізаторів класу А, мережевої синхронізації часу та централізованого збереження вимірювальної інформації.

1.8 Вплив електромагнітних перешкод

Станом на 2025 рік електронні та мікроелектронні засоби керування є невіддільною складовою систем електропостачання промислових підприємств. Програмовані логічні контролери, мікропроцесорні пристрої релейного захисту, частотні перетворювачі, системи автоматичного регулювання, вимірювальні перетворювачі, промислові комп’ютери та цифрові мережі передавання даних забезпечують керування технологічними процесами й контроль стану обладнання. Водночас поширення таких пристроїв підвищує вимоги до електромагнітної сумісності, оскільки електронна апаратура може бути чутливою до короткочасних змін напруги, імпульсних перенапруг, високочастотних завад і порушень у колах заземлення.

У сучасній нормативній термінології під електромагнітною завадою розуміють електромагнітне явище, яке може погіршувати роботу технічного засобу, спричиняти втрату інформації, помилкове спрацьовування захисту або порушення функціонування системи керування. Електромагнітна сумісність передбачає здатність обладнання нормально працювати в заданому електромагнітному середовищі та водночас не створювати неприпустимих завад для інших пристроїв.

Для металургійного підприємства проблема електромагнітних завад має особливе значення. У системі електропостачання ПрАТ «Дніпроспецсталь» одночасно можуть працювати потужні асинхронні двигуни, електричні печі, випрямлячі, частотні перетворювачі, зварювальні установки, трансформатори, конденсаторні батареї та фільтрокомпенсувальні пристрої. Комутація такого обладнання супроводжується різкими змінами струмів і напруг, які поширюються електричною мережею та можуть впливати на вторинні кола, пристрої автоматизації, зв’язку і захисту.

За характером поширення електромагнітні завади поділяють на кондуктивні, які передаються проводами, кабелями, колами живлення та заземлення, і випромінювані, які поширюються у просторі у вигляді електричного, магнітного або електромагнітного поля. У промислових мережах найчастіше спостерігаються низькочастотні кондуктивні завади, зокрема провали, підвищення та коливання напруги, несиметрія, гармоніки й інтергармоніки. До швидких перехідних завад належать імпульсні перенапруги, пакети високочастотних імпульсів, комутаційні сплески та завади, спричинені грозовими розрядами.

Перехідні електромагнітні процеси можуть тривати від дуже коротких імпульсів до кількох періодів промислової частоти або декількох секунд. Швидкі імпульсні процеси мають широкий частотний спектр, тому можуть проникати не лише через силові кола, але й через сигнальні кабелі, кола керування, корпуси обладнання та систему захисного заземлення. Особливо небезпечним є одночасний вплив декількох видів завад, наприклад провалу напруги разом із високочастотним імпульсом під час аварійного вимкнення комутаційного апарата.

Однією з найпоширеніших причин появи провалів напруги є коротке замикання в зовнішній або внутрішній електричній мережі. Провал може виникати під час однофазного замикання на землю, міжфазного пошкодження, пуску потужного електродвигуна, увімкнення трансформатора або одночасного самозапуску групи електроприводів після відновлення електропостачання. Після вимкнення пошкодженої ділянки та роботи автоматичного повторного ввімкнення напруга може відновитися, однак навіть короткочасного порушення іноді достатньо для зупинки електронного обладнання.

Під час провалу напруги контактори можуть відпадати, частотні перетворювачі — переходити в аварійний режим, а програмовані контролери — перезавантажуватися або втрачати зв’язок із периферійними пристроями. Наслідком може бути неконтрольована зупинка електропривода, порушення технологічної послідовності, втрата частини виробничих даних або необхідність

ручного відновлення роботи агрегату. Для безперервних металургійних процесів навіть короткочасна зупинка окремої системи керування може спричинити значні технологічні та економічні втрати.

Випробування електронного й електротехнічного обладнання на стійкість до провалів напруги, короткочасних переривань і змін напруги регламентує чинний в Україні ДСТУ EN IEC 61000-4-11:2022. Він поширюється на обладнання з вхідним струмом до 16 А на фазу та застосовується для оцінювання поведінки контролерів, вимірювальної апаратури, блоків живлення й іншого малопотужного обладнання. Для промислових пристроїв зі струмом понад 16 А на фазу міжнародним нормативним орієнтиром є IEC 61000-4-34, до якого у 2025 році було внесено чергові зміни.

Іншою небезпечною групою завад є імпульсні перенапруги. Вони виникають унаслідок грозових розрядів, перемикання повітряних і кабельних ліній, вимкнення індуктивних навантажень, комутації трансформаторів, конденсаторних батарей і резонансних фільтрів. Значні перенапруги також можуть утворюватися під час замикань на землю, обривів нейтрального провідника, неправильного функціонування заземлювальних пристроїв та резонансних явищ у мережі.

Навіть якщо енергії імпульсу недостатньо для миттєвого руйнування обладнання, його повторна дія може поступово пошкоджувати ізоляцію, напівпровідникові елементи, вхідні кола контролерів і джерела живлення. Наслідком стає приховане старіння електронних компонентів, зниження електричної міцності ізоляції та збільшення ймовірності подальшої аварійної відмови.

Стійкість обладнання до однополярних сплесків, викликаних комутаційними процесами та блискавкою, у 2025 році оцінюють відповідно до ДСТУ EN 61000-4-5:2023, чинного в Україні з 1 серпня 2024 року. Стандарт визначає методику випробувань, умови подавання імпульсів і рекомендовані рівні випробувальної дії для різних електромагнітних умов експлуатації.

Під час роботи контакторів, електромагнітних реле, пускачів, тиристорних комутаторів та інших швидкодійних апаратів можуть утворюватися пакети коротких високочастотних імпульсів. Такі завади здатні проникати до цифрових входів контролерів, інтерфейсів зв’язку та вимірювальних каналів. Вони можуть спричиняти появу помилкових сигналів, порушення передавання команд, зависання програмного забезпечення або короткочасну втрату зв’язку між окремими елементами автоматизованої системи.

Методи випробування обладнання на стійкість до електричних швидких перехідних процесів і пакетів імпульсів установлює ДСТУ EN 61000-4-4:2022, чинний в Україні з 1 вересня 2023 року. Під час такого випробування оцінюють не лише повну відмову обладнання, але й тимчасове погіршення його функціонування, можливість самостійного відновлення та збереження встановлених параметрів роботи.

Значний вплив на електромагнітне середовище промислового підприємства чинять гармонійні та інтергармонійні складові. Основними джерелами таких завад є випрямлячі, частотні перетворювачі, дугові печі, імпульсні блоки живлення та інші нелінійні електроприймачі. Гармоніки спричиняють додаткове нагрівання трансформаторів, кабелів і електричних машин, підвищують навантаження на конденсаторні установки та можуть порушувати роботу вимірювальних і захисних пристроїв.

Особливу небезпеку становить взаємодія гармонійних струмів з індуктивністю мережі та ємністю конденсаторних батарей. За певного співвідношення параметрів може виникати резонанс, унаслідок якого напруга або струм окремої гармоніки значно збільшуються. Це призводить до перевантаження конденсаторів, прискореного старіння їхньої ізоляції, спрацювання захисту або пошкодження фільтрокомпенсувального обладнання.

Сучасним міжнародним документом для оцінювання електромагнітного середовища всередині промислових підприємств є IEC 61000-2-4:2024. Він установлює рівні сумісності для кондуктивних завад у внутрішніх промислових мережах напругою до 35 кВ і розглядає частотний діапазон від постійної

складової до 150 кГц. Для системи електропостачання ПрАТ «Дніпроспецсталь» положення цього стандарту можуть застосовуватися як сучасний міжнародний орієнтир під час аналізу електромагнітного середовища на секціях шин 6 і 10 кВ.

Якість електроенергії та електромагнітна сумісність тісно пов’язані з надійністю компенсаційних пристроїв. За нормальної роботи активні фільтри, статичні компенсатори, реактори й конденсаторні батареї зменшують рівень гармонік, коливань напруги, несиметрії та реактивного навантаження. Проте аварійне вимкнення або несправність такого пристрою може призвести до швидкого погіршення параметрів мережі. У результаті можливі помилкові спрацьовування релейного захисту, аварійні вимкнення частотних перетворювачів, перевантаження електричних двигунів і порушення роботи цифрових систем керування.

Електромагнітні завади можуть впливати не лише на силове обладнання, але й на канали передавання інформації. За недостатнього екранування або неправильного прокладання кабелів завади із силових кіл проникають у сигнальні лінії, викликаючи спотворення аналогових сигналів, помилки цифрового обміну та некоректне передавання команд до комутаційних пристроїв. Особливо чутливими є довгі низьковольтні лінії датчиків, інтерфейси без гальванічного розділення та кабелі, прокладені паралельно із силовими проводами потужних електроприводів.

Загальні вимоги до стійкості електричного й електронного обладнання, призначеного для експлуатації у промисловому середовищі, установлює ДСТУ EN IEC 61000-6-2:2022, чинний з 1 червня 2023 року. Документ охоплює вимоги до несприйнятливості обладнання та критерії оцінювання його працездатності під час і після дії електромагнітних завад.

Вимірювання й реєстрацію показників якості електроенергії станом на 2025 рік доцільно виконувати відповідно до ДСТУ EN 61000-4-30:2022, чинного в Україні з 31 грудня 2023 року. Стандарт визначає методи вимірювання, правила агрегування результатів і класи вимірювальних приладів. Для аналізу відповідальних вузлів підприємства доцільно використовувати прилади класу A,

які забезпечують відтворюваність результатів і дають змогу порівнювати дані, отримані різними засобами контролю.

У жовтні 2025 року на міжнародному рівні було опубліковано нову редакцію IEC 61000-4-30:2025, у якій збережено поділ методів вимірювання на класи A та S. Однак у роботі, що розглядає українську нормативну базу саме станом на 2025 рік, основним національним документом слід зазначати ДСТУ EN 61000-4-30:2022, а IEC 61000-4-30:2025 — як актуалізовану міжнародну редакцію.

Для зменшення впливу електромагнітних завад на ПрАТ «Дніпроспецсталь» необхідно забезпечувати роздільне прокладання силових і сигнальних кабелів, використовувати екрановані лінії та оптоволоконні канали зв’язку, виконувати зрівнювання потенціалів і контролювати стан захисного заземлення. На вводах живлення відповідального обладнання доцільно застосовувати багатоступеневі пристрої захисту від імпульсних перенапруг, мережеві фільтри, розділові трансформатори та джерела безперебійного живлення.

Контролери, мікропроцесорні захисти, промислові комп’ютери та комунікаційне обладнання необхідно забезпечувати резервованим або гарантованим живленням. Реєстратори аварійних подій і аналізатори якості електроенергії повинні мати синхронізовані часові позначки, щоб можна було зіставляти провали, сплески та переривання напруги з аварійними зупинками технологічних агрегатів.

Таким чином, електромагнітні завади істотно впливають на надійність електропостачання, стійкість автоматизованих систем і безперервність технологічного процесу. Їхній вплив необхідно враховувати комплексно — від контролю якості напруги та випробування обладнання на несприйнятливість до правильного проєктування кабельних трас, заземлення, захисту від перенапруг і резервного живлення. Для ПрАТ «Дніпроспецсталь» виконання цих заходів дає змогу зменшити кількість помилкових спрацьовувань, запобігти пошкодженню

електронної апаратури та підвищити загальну надійність системи електропостачання.

1.9Контроль показників якості електричної енергії

1.9.1 Основні завдання та види контролю якості електричної енергії

Контроль якості електричної енергії є складовою системи технічного управління електропостачанням промислового підприємства. Його проведення спрямоване на забезпечення надійної роботи електрообладнання, зменшення технологічних втрат, попередження аварійних режимів та підтримання характеристик напруги в установлених межах.

Станом на 2025 рік характеристики напруги в електричних мережах загальної призначеності оцінюються відповідно до ДСТУ EN 50160:2023, українська редакція якого набула чинності 1 березня 2025 року. Методи вимірювання, часової агрегації та реєстрації показників якості електроенергії встановлюються ДСТУ EN 61000-4-30:2022, що є чинним із 31 грудня 2023 року. Порядок взаємодії споживача з оператором системи розподілу щодо якості електричної енергії регулюється Кодексом систем розподілу.

Основними завданнями контролю якості електричної енергії на ПрАТ «Дніпроспецсталь» є визначення фактичних характеристик напруги в точках приєднання та внутрішніх вузлах системи електропостачання, перевірка їх відповідності нормативним і договірним вимогам, виявлення джерел гармонічних спотворень, несиметрії, коливань та провалів напруги, а також оцінювання впливу таких порушень на роботу технологічного обладнання.

До завдань контролю також належать перевірка виконання технічних умов приєднання електроустановок, визначення впливу окремих електроприймачів на загальний режим мережі, контроль роботи засобів регулювання напруги й компенсації реактивної потужності, розроблення організаційних і технічних

заходів з підвищення якості електропостачання та підготовка доказової інформації у разі виникнення розбіжностей між підприємством і оператором системи розподілу.

У сучасних нормативних документах недоцільно використовувати поняття «пошук винуватця погіршення якості електроенергії». Більш коректним є визначення джерела електромагнітного збурення, напрямку його поширення, ступеня впливу на суміжні електроустановки та відповідальності сторін відповідно до межі балансової належності, технічних умов і договору про розподіл електричної енергії.

Залежно від поставленої мети контроль якості електричної енергії на підприємстві може здійснюватися у формі діагностичного, перевірочного, оперативного та безперервного автоматизованого контролю.

Діагностичний контроль

Діагностичний контроль проводиться для встановлення причин погіршення характеристик напруги та визначення джерел електромагнітних завад. Такий контроль доцільно виконувати під час приєднання нового обладнання, реконструкції системи електропостачання, введення в експлуатацію потужних нелінійних електроприймачів, виникнення аварійних відключень, перегрівання електродвигунів або надходження скарг від виробничих підрозділів.

Під час діагностичного контролю вимірюються не лише характеристики напруги, а й струми навантаження, активна, реактивна та повна потужність, коефіцієнт потужності, гармонічні складові струму й напруги, а також симетричні складові трифазної системи. Одночасний аналіз напруги та струму дає змогу визначити, чи надходить спотворення із зовнішньої електричної мережі, чи створюється обладнанням підприємства.

Офіційні вимірювання під час розгляду скарги щодо якості електричної енергії повинні проводитися протягом не менше семи календарних днів, без урахування тривалості перерв в електропостачанні. Для внутрішніх досліджень підприємства тривалість діагностичного контролю також доцільно

встановлювати не меншою за один тиждень або за повний технологічний цикл, якщо він триває довше.

Першою точкою діагностичного контролю повинна бути точка розподілу електричної енергії або межа балансової належності між ПрАТ «Дніпроспецсталь» та оператором системи розподілу. Наступними точками є шини головних понижувальних підстанцій, розподільчих пунктів, цехових трансформаторних підстанцій і вводи найбільш потужних або нелінійних електроприймачів.

На металургійному підприємстві особливу увагу необхідно приділяти електродуговим печам, перетворювачам частоти, випрямним установкам, зварювальному обладнанню, прокатним електроприводам і потужним асинхронним двигунам. Порівняння результатів вимірювань у кількох точках дозволяє встановити напрямок поширення спотворень та оцінити внесок окремого технологічного агрегату.

Якщо під час діагностичного контролю встановлено, що причиною порушення є обладнання підприємства, енергетична служба повинна розробити заходи щодо обмеження його впливу. Такими заходами можуть бути встановлення фільтрів гармонік, симетрування навантажень, компенсація реактивної потужності, зміна схеми живлення, розподіл навантажень між трансформаторами, регулювання режимів роботи перетворювачів або зміна черговості ввімкнення потужних агрегатів.

Перевірочний контроль

Перевірочний контроль проводиться після виконання реконструкції, ремонту або впровадження заходів із підвищення якості електроенергії. Його метою є підтвердження того, що встановлені фільтри, компенсувальні пристрої, трансформатори з регулюванням під навантаженням, автоматичні регулятори та інші технічні засоби забезпечують необхідний результат.

Такий контроль також виконується під час перевірки виконання технічних умов приєднання нового споживача або електроустановки, після зміни потужності підприємства, заміни силових трансформаторів, модернізації

електроприводів і введення в експлуатацію власних генеруючих установок або накопичувачів електричної енергії.

У сучасних умовах перевірочний контроль не слід ототожнювати із застарілою процедурою обов'язкової сертифікації електричної енергії. Основну увагу необхідно приділяти відповідності характеристик напруги нормативним вимогам, правильності застосованих методів вимірювання та метрологічній придатності вимірювального обладнання.

Оперативний контроль

Оперативний контроль здійснюється в режимі експлуатації в тих точках електричної мережі, де існує підвищена ймовірність порушення характеристик напруги або де наслідки таких порушень можуть призвести до значних технологічних та економічних втрат.

На ПрАТ «Дніпроспецсталь» оперативний контроль доцільно організувати на шинах головних підстанцій, біля електродугових печей, потужних перетворювачів, відповідальних електроприводів, систем автоматизації та обладнання, чутливого до провалів і короткочасних переривань напруги.

Результати оперативного контролю повинні передаватися до диспетчерського пункту або автоматизованої системи енергетичного моніторингу підприємства. У разі виходу параметрів за встановлені попереджувальні межі система повинна формувати повідомлення, фіксувати час виникнення порушення та зберігати осцилограми або інші подієві дані.

Оперативний контроль дозволяє відстежувати роботу трансформаторів із регулюванням під навантаженням, конденсаторних установок, статичних компенсаторів реактивної потужності, фільтрокомпенсувальних пристроїв, релейного захисту та автоматики. Він також забезпечує накопичення статистики щодо провалів, перенапруг, переривань і швидких змін напруги.

Автоматизований контроль та використання даних комерційного обліку

Безперервний автоматизований контроль передбачає застосування стаціонарних аналізаторів якості електроенергії, багатофункціональних

електронних лічильників і каналів передавання інформації до централізованої бази даних.

Сучасні електронні лічильники можуть фіксувати усереднені значення напруги, струму та напрямки перетікання електроенергії. Кодекс систем розподілу допускає використання даних лічильників, що працюють у складі автоматизованої системи комерційного обліку та мають функцію фіксації напруги і струму на десятихвилинних проміжках часу, під час розгляду питань щодо якості електроенергії.

Водночас наявність функції вимірювання напруги в лічильнику не завжди означає, що він може повністю замінити спеціалізований аналізатор. Для контролю гармонік, флікера, несиметрії, провалів і перенапруг необхідно використовувати обладнання, яке підтримує відповідні стандартизовані методи вимірювання.

Комерційний облік електроенергії у 2025 році призначений насамперед для визначення обсягів споживання, виробництва та перетікання електричної енергії. Тому поняття «комерційний облік якості електроенергії» слід застосовувати обережно. Дані приладів комерційного обліку можуть використовуватися як складова системи моніторингу, однак автоматичне нарахування тарифних надбавок за вихід показників якості за межі стандарту чинним механізмом не передбачається.

1.9.2 Організація контролю якості електричної енергії у 2025 році

Контроль характеристик напруги у 2025 році повинен здійснюватися з урахуванням положень ДСТУ EN 50160:2023, ДСТУ EN 61000-4-30:2022, Кодексу систем розподілу, договору про надання послуг із розподілу електричної енергії та технічних умов приєднання.

ДСТУ EN 50160:2023 визначає характеристики напруги, які очікуються в точці приєднання користувача за нормальних умов експлуатації електричної мережі. ДСТУ EN 61000-4-30:2022 установлює класи вимірювання, порядок організації спостережень, перелік контрольованих величин і правила агрегації результатів.

Для офіційного розгляду звернень щодо якості електричної енергії оператор системи розподілу повинен застосовувати засоби вимірювальної техніки, які пройшли оцінку відповідності вимогам Технічного регламенту законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки. Результати оформлюються протоколом вимірювання параметрів якості електричної енергії.

Споживач за письмовою згодою оператора системи розподілу може самостійно організувати вимірювання із залученням профільної організації, яка має необхідні засоби вимірювальної техніки. Якщо результати підтверджують недотримання нормативних показників з боку оператора системи розподілу, оператор повинен відшкодувати споживачу обґрунтовані витрати на проведення таких вимірювань.

У разі встановлення приладу на території підприємства необхідно забезпечити його захист від несанкціонованого втручання, пошкодження та зміни схеми підключення. Представники підприємства й оператора системи розподілу повинні зафіксувати місце встановлення, схему приєднання, заводський номер, метрологічні документи, коефіцієнти трансформації, дату та час початку вимірювань.

Під час офіційної перевірки тривалість вимірювання повинна становити не менше семи календарних днів. Скорочення цього періоду допускається, якщо факт недотримання показників якості вже визнано оператором системи розподілу або причини порушення є очевидними та документально підтвердженими.

Для внутрішнього контролю на підприємстві доцільно застосовувати таку періодичність:

– безперервний моніторинг у точках приєднання та біля найбільш відповідальних електроприймачів;

– планові тижневі вимірювання один або два рази на рік із врахуванням сезонного максимуму і мінімуму навантаження;

– позаплановий контроль після реконструкції, аварії, заміни трансформатора, введення нового технологічного агрегату або надходження скарг;

– повторні вимірювання після реалізації заходів із нормалізації характеристик напруги.

Наведена періодичність є організаційною рекомендацією для підприємства. Чинні нормативні документи не встановлюють універсальної вимоги проводити всі види вимірювань саме двічі на рік. Періодичність повинна визначатися структурою мережі, характером технологічного навантаження, результатами попереднього моніторингу та рівнем ризику.

Під час контролю необхідно реєструвати діючі значення напруги, частоту, гармонічні та інтергармонічні складові, сумарний коефіцієнт гармонічного спотворення, несиметрію напруги, короткочасний і тривалий флікер, провали, тимчасові перенапруги, швидкі зміни напруги та переривання електропостачання.

Для пошуку джерела спотворення одночасно контролюються фазні струми, гармонічні складові струму, активна та реактивна потужність, коефіцієнт потужності, а також режим роботи технологічного обладнання. Електричні дані необхідно синхронізувати з оперативними журналами ввімкнення електродугових печей, електродвигунів, перетворювачів і компенсувальних установок.

Результати вимірювань параметрів усталеного режиму агрегуються за десятихвилинними інтервалами. Повний тиждень спостереження містить 1008 десятихвилинних інтервалів. Для більшості нормованих характеристик визначається частка інтервалів, у яких параметр відповідає встановленій межі.

Окремо аналізуються подієві характеристики: провали, перенапруги, переривання та швидкі зміни напруги.

Використаний у старих нормативних документах розрахунок хвилинного середньоквадратичного значення на основі щонайменше 18 спостережень не повинен залишатися основним способом оцінювання відповідності у 2025 році. Сучасна методика передбачає стандартизоване вимірювання діючого значення напруги та подальшу агрегацію результатів відповідно до ДСТУ EN 61000-4-30:2022.

За результатами контролю формується технічний звіт, у якому зазначаються схема електропостачання, точки та період вимірювання, характеристики приладу, умови роботи мережі, кількість придатних інтервалів, максимальні й мінімальні значення, кількість порушень, графіки зміни параметрів і висновок щодо їх відповідності.

1.9.3 Компенсація за недотримання стандартів якості електропостачання

Застосовуваний раніше механізм знижок і надбавок до тарифів залежно від числових значень показників якості електроенергії не відповідає сучасній моделі роздрібного ринку електричної енергії України. У 2025 році захист прав споживачів здійснюється шляхом розгляду звернень і надання компенсації за недотримання гарантованих стандартів якості електропостачання. Порядок забезпечення стандартів якості електропостачання та надання компенсацій затверджений постановою НКРЕКП від 12 червня 2018 року № 375. Станом на 2025 рік ним передбачалися гарантовані стандарти для операторів систем розподілу, оператора системи передачі та електропостачальників. Скарга або претензія споживача щодо якості електричної енергії повинна бути розглянута оператором системи розподілу протягом 15 днів, якщо проведення додаткових вимірювань не потрібне. Якщо необхідно здійснити вимірювання, строк

розгляду становить 30 днів, а для колективного звернення групи споживачів — 45 днів. Якщо скарга визнається обґрунтованою, оператор системи розподілу повинен повідомити споживача про причини недотримання показників, результати вимірювань, заплановані заходи та строки усунення порушення. Якщо скарга не задовольняється, оператор повинен надати результати вимірювань або інші документи, які підтверджують дотримання нормативних показників, порушення вимог з боку споживача чи наявність форс-мажорних обставин. Компенсація надається не як довільна знижка до ціни електричної енергії, а відповідно до визначених НКРЕКП гарантованих стандартів та встановленої процедури. Залежно від умов договору сума може бути врахована в рахунку за послуги з розподілу або передана через електропостачальника. Для окремих процедур максимальний строк надання компенсації становить 45 днів.

Сам факт одиничного виходу напруги за встановлену межу не завжди автоматично означає нарахування компенсації. Необхідно дотриматися процедури реєстрації звернення, проведення вимірювань, підтвердження недотримання показників і визначення відповідальності оператора системи розподілу.

Компенсація може не надаватися, якщо недотримання гарантованих стандартів спричинене доведеними форс-мажорними обставинами, пошкодженням енергетичної інфраструктури, діями споживача, застосуванням аварійних обмежень або іншими обставинами, передбаченими нормативними актами.

Надання компенсації не позбавляє споживача права вимагати від оператора системи або електропостачальника відшкодування документально підтверджених збитків, заподіяних унаслідок недотримання показників якості електропостачання.

Посилання на статтю 547 Цивільного кодексу України в цьому контексті необхідно вилучити, оскільки ця стаття регулює форму правочину щодо забезпечення виконання зобов’язання і безпосередньо не визначає порядок відшкодування збитків від неналежної якості електроенергії.

Для ПрАТ «Дніпроспецсталь» економічний механізм підвищення якості електропостачання повинен полягати не лише в отриманні компенсації. Основний ефект має досягатися шляхом запобігання технологічним простоям, пошкодженню електродвигунів, перегріванню трансформаторів, збільшенню втрат електроенергії та скороченню строку служби ізоляції.

Таким чином, система контролю якості електричної енергії у 2025 році має поєднувати стандартизовані тижневі вимірювання, постійний автоматизований моніторинг, аналіз технологічних режимів, документальне оформлення результатів і реалізацію технічних заходів. Компенсація за недотримання гарантованих стандартів є додатковим засобом захисту споживача, але не замінює системної роботи підприємства та оператора мережі з усунення причин погіршення якості електропостачання.

1.10 Коротка характеристика об’єкта дослідження

ПрАТ «Електрометалургійний завод “Дніпроспецсталь” ім. А. М. Кузьміна» засновано у 1932 році в місті Запоріжжі. Підприємство спеціалізується на виробництві високоякісних спеціальних сталей і сплавів, зокрема нержавіючих, конструкційних, інструментальних, швидкорізальних, підшипникових, жароміцних та інших марок. Основними видами продукції є сортовий прокат круглого, квадратного і шестигранного перерізу, калібрований метал, поковки, зливки та металопродукція зі спеціальною обробкою поверхні.

Станом на 2025 рік ПрАТ «Дніпроспецсталь» продовжувало виробничу діяльність в умовах воєнного стану, нестабільного електропостачання, ускладненої логістики, дефіциту окремих видів сировини та зниження попиту на металопродукцію. Ці чинники спричинили скорочення обсягів виробництва. У 2025 році підприємством виготовлено 62,019 тис. т металопродукції, що на 11,8

% менше, ніж у 2024 році. Обсяг реалізації становив 61,900 тис. т, а чистий дохід від реалізації — 5,331 млрд грн.

Таблиця 1.4 – Основні показники діяльності ПрАТ «Дніпроспецсталь»

Показник	2024 рік	2025 рік	Зміна
Обсяг виробництва металопродукції, т	70 333	62 019	–11,8 %
Обсяг реалізованої металопродукції, т	71 575	61 900	–13,5 %
Чистий дохід від реалізації, тис. грн	5 686 039	5 330 967	–6,2 %
Собівартість реалізованої продукції, тис. грн	5 172 387	5 116 927	–1,1 %
Валовий прибуток, тис. грн	513 652	214 040	–58,3 %
Чистий фінансовий результат, тис. грн	–582 427	–711 015	збиток збільшився на 22,1 %
Експорт продукції, тис. грн	1 981 948	1 779 425	–10,2 %
Частка експорту в доході, %	34,8	33,4	–1,4 в. п.
Середньооблікова чисельність працівників, осіб	—	2 233	—
Загальна чисельність працівників на кінець року, осіб	—	2 814	—

Порівняно з 2024 роком підприємство скоротило виробництво на 8,314 тис. т. Зниження обсягу реалізації було ще більшим і становило 9,675 тис. т. Водночас собівартість реалізованої продукції зменшилася лише на 1,1 %, що свідчить про зростання питомих витрат на виготовлення одиниці продукції. Однією з основних причин стало підвищення середньої вартості електроенергії приблизно на 10 %, а природного та доменного газу — на 47 %. Внаслідок цього валовий прибуток підприємства зменшився більш ніж удвічі, а чистий збиток досяг 711,015 млн грн.

Виробнича структура підприємства

Технологічна структура ПрАТ «Дніпроспецсталь» охоплює повний цикл електрометалургійного виробництва: підготовку металошихти, виплавку сталі, позапічну обробку, переплав спеціальних сталей, розливання, прокатування або кування, термічну обробку, механічне оброблення поверхні та контроль якості готової продукції.

Сталеплавильне виробництво включає сталеплавильні цехи № 2, № 3 і № 5, а також цех порошкової металургії. До передільного виробництва належать прокатний, калібрувальний, ковальський, ковальсько-пресовий, термічний цехи та цех ад'юстажної обробки металу.

Таблиця 1.5 – Характеристика основних виробничих цехів

Підрозділ	Основне обладнання та призначення
Цех порошкової металургії	Індукційна піч місткістю 4 т; виробництво швидкорізальних та інструментальних сталей методом порошкової металургії
Сталеплавильний цех № 2	Електродугові та індукційна печі, аргонокисневий конвертер, установка «піч-ківш»; виробництво корозійностійких, жароміцних сталей і спеціальних сплавів
Сталеплавильний цех № 3	Електродугові печі, установка «піч-ківш», вакууматор; виплавка та позапічне доведення високоякісної сталі
Сталеплавильний цех № 5	Установки електрошлакового та вакуумно-дугового переплаву; отримання особливо чистих сталей і сплавів
Прокатний цех	Сортозаготівельний стан 1050/950 та сортові стани 550, 325 і 280; виробництво заготовки та сортового прокату діаметром 12–280 мм
Калібрувальний цех	Холодне калібрування, волочіння, обробка поверхні та отримання металопродукції підвищеної точності
Ковальсько-пресовий цех	Гідравлічні преси зусиллям 60 і 32 МН; виробництво великогабаритних поковок круглого, квадратного та прямокутного перерізу
Ковальський цех	Радіально-кувальні машини зусиллям 10 і 3,4 МН; виробництво прутків із важкодеформованих легованих сталей
Термічний цех	Нагрівальні й термічні печі; відпал, нормалізація, гартування, відпуск та інші види термообробки
Цех ад'юстажної обробки металу	Обточування, шліфування, механічна обробка поверхні, правка та остаточне доведення прутків

Основними споживачами електричної енергії на підприємстві є електродугові й індукційні печі, установки електрошлакового та вакуумно-дугового переплаву, електроприводи прокатних станів, насосне і компресорне обладнання, димососи, вентилятори газоочисних установок, вакуумні установки, підіймально-транспортне обладнання та системи водоохолодження. Значні обсяги природного газу й теплової енергії використовуються в нагрівальних і термічних печах, а також для опалення виробничих та адміністративно-побутових приміщень.

Структура реалізованої металопродукції

У 2025 році найбільшу частку фізичного обсягу реалізації становили конструкційні леговані та конструкційні вуглецеві сталі. Водночас значну частину доходу забезпечувала нержавіюча нікелева сталь, що пояснюється її високою доданою вартістю.

Таблиця 1.6 – Структура реалізації металопродукції у 2025 році

Група сталей	Обсяг реалізації, т	Середня ціна без ПДВ, грн/т	Чистий дохід, тис. грн
Конструкційна легована	24 800	71 118	1 763 747
Нержавіюча нікелева	9 743	171 009	1 666 127
Конструкційна вуглецева	21 216	41 817	887 186
Інструментальна легована	3 088	103 008	318 129
Нержавіюча безнікелева	1 528	145 153	221 814
Жароміцна	120	1 915 414	230 198
Підшипникова	1 181	59 988	70 839
Швидкорізальна	224	733 142	164 017
Інша реалізація	—	—	8 910
Усього	61 900	—	5 330 967

Споживання енергетичних і водних ресурсів

ПрАТ «Дніпроспецсталь» належить до енергоємних промислових підприємств. Висока електроємність виробництва зумовлена використанням електродугового способу виплавки сталі, електричних установок спеціального переплаву та потужних електроприводів технологічного обладнання.

У 2025 році підприємство спожило 179,464 млн кВт·год активної електроенергії. Вартість придбаної електроенергії без ПДВ становила 1,062 млрд грн. Крім того, використано 16,748 млн м³ технічної та 1,387 млн м³ питної води.

Таблиця 1.7 – Споживання ресурсів підприємством у 2025 році

Вид ресурсу	Одиниця вимірювання	Фактичний обсяг	Вартість без ПДВ, тис. грн
Активна електрична енергія	тис. кВт·год	179 464	1 062 033
Технічна вода	тис. м³	16 748	60 776
Питна вода та вода для господарських потреб	тис. м³	1 387	12 796

Скидання стічних вод у каналізацію	тис. м³	1 421	23 098
Природний і доменний газ	—	окремий фізичний обсяг не оприлюднено	включено до виробничих витрат
Теплова енергія	Гкал	окремий фізичний обсяг не оприлюднено	включено до виробничих витрат
Енергоносії, теплопостачання та інші виробничі послуги загалом	тис. грн	—	1 743 624

У річній звітності фізичні обсяги використання природного газу та теплової енергії окремо не наведені. Їхня вартість відображена у складі агрегованої статті «Енергоносії, теплопостачання та інші послуги». У 2025 році ця стаття становила 1,744 млрд грн проти 1,533 млрд грн у 2024 році, тобто збільшилася приблизно на 13,7 %.

Для включення до енергетичного балансу точних фізичних обсягів природного газу та теплової енергії необхідно використовувати внутрішню звітність енергетичної служби підприємства, показання комерційних приладів обліку або статистичну форму щодо використання палива й енергії.

Таблиця 1.8 – Розрахункові показники електроспоживання у 2025 році

Показник	Розрахункове значення
Загальне споживання електроенергії	179,464 млн кВт·год
Середнє місячне споживання	14,955 млн кВт·год
Середнє добове споживання	491,7 тис. кВт·год
Середня вартість 1 кВт·год без ПДВ	5,92 грн/кВт·год
Інтегральне питоме споживання на 1 т виготовленої продукції	2 894 кВт·год/т
Витрати на електроенергію на 1 т продукції	17,12 тис. грн/т
Частка вартості електроенергії в собівартості реалізації	близько 20,8 %
Частка агрегованої статті енергоносіїв, тепла та послуг у собівартості	близько 34,1 %
Скорочення непродуктивних втрат електроенергії	2,211 млн кВт·год

Розрахункові показники визначені за загальнозаводським споживанням електроенергії та загальним обсягом виробництва 62,019 тис. т. Тому питоме споживання 2 894 кВт·год/т характеризує не лише процес виплавки сталі, а весь

технологічний комплекс підприємства, включаючи прокатне, ковальське, термічне, допоміжне виробництво, освітлення та загальнозаводські потреби.

Протягом 2025 року підприємству вдалося скоротити непродуктивні втрати електроенергії на 2,211 млн кВт·год. Основними заходами стали зменшення тривалості міжплавильних простоїв дугових печей та регулювання режимів роботи електроприводів за допомогою перетворювальної техніки. Досягнута економія відповідає приблизно 1,23 % річного електроспоживання підприємства.

З огляду на значну частку енергетичних витрат у собівартості продукції, одним із пріоритетних напрямів розвитку ПрАТ «Дніпроспецсталь» залишається підвищення енергоефективності. До перспективних заходів належать оптимізація графіків роботи електропечей, зменшення простоїв основного обладнання, застосування частотно-регульованих електроприводів насосів, вентиляторів і димососів, компенсація реактивної потужності, контроль показників якості електроенергії, модернізація нагрівальних печей і використання вторинних енергетичних ресурсів.

У 2025 році підприємство також підтвердило статус підприємства «зеленої» електрометалургії. На заводі експлуатуються системи пилогазоочищення, а частину нагрівальних і термічних печей модернізовано з метою зменшення споживання енергоносіїв та викидів забруднюючих речовин.

Таким чином, ПрАТ «Дніпроспецсталь» є складним електрометалургійним комплексом із великою кількістю потужних, нелінійних і різкозмінних електроспоживачів. Значні обсяги електроспоживання, висока частка енергетичних витрат у собівартості та залежність виробничої діяльності від безперебійності електропостачання обґрунтовують доцільність дослідження показників якості електричної енергії, режимів роботи електротехнічного обладнання та можливостей зниження непродуктивних енергетичних втрат.

2 ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

2.1 Постановка задач дослідження

Наявність вищих гармонійних складових струму та напруги є одним із найпоширеніших проявів погіршення якості електричної енергії в системах електропостачання металургійних підприємств. Основними джерелами гармонійних спотворень є потужні нелінійні електроприймачі: випрямлячі, тиристорні перетворювачі, частотно-регульовані електроприводи, електродугові печі, зварювальні установки, імпульсні джерела живлення та інше перетворювальне обладнання. Струми, які споживають такі установки, мають несинусоїдальну форму та спричиняють появу додаткових складових напруги на опорах трансформаторів, кабельних ліній, шин і комутаційних апаратів.

Поширення вищих гармонік у внутрішній електричній мережі призводить до збільшення середньоквадратичного значення струму без відповідного зростання корисної активної потужності. Унаслідок цього підвищуються втрати електроенергії в кабельних і повітряних лініях, трансформаторах, реакторах, електродвигунах та іншому електрообладнанні. Збільшення струмового навантаження спричиняє додаткове нагрівання провідників, погіршення умов охолодження і зменшення допустимого навантаження елементів системи електропостачання.

Особливо значний вплив гармонійні складові чинять на силові та перетворювальні трансформатори. За несинусоїдальної форми струму зростають втрати в обмотках, зумовлені скін-ефектом і ефектом близькості. Струм високої частоти розподіляється по перерізу провідника нерівномірно, концентруючись переважно біля його поверхні. У результаті ефективний опір обмотки збільшується, а її температура підвищується навіть за умови, що загальне навантаження трансформатора не перевищує номінального значення.

Одночасно з цим зростають втрати на вихрові струми в магнітопроводі, конструктивних елементах, баку, кріпленнях та інших металевих частинах трансформатора. Зі збільшенням порядку гармоніки частота струму підвищується, тому додаткові втрати можуть зростати значно швидше, ніж амплітуда самої гармонійної складової. Це призводить до зниження фактичного коефіцієнта корисної дії трансформатора, необхідності обмеження його навантаження та прискореного теплового старіння ізоляції.

Подібні процеси спостерігаються і в перетворювальних трансформаторах, які живлять випрямні й тиристорні установки. Гармонійні струми створюють додаткові втрати в обмотках та магнітопроводі, погіршують тепловий режим і знижують ефективність передавання електричної енергії до перетворювача. Водночас спотворення форми напруги може негативно впливати на процес комутації вентилів, збільшувати пульсації випрямленої напруги та погіршувати енергетичні характеристики випрямного обладнання.

Тривала робота електрообладнання за підвищеного рівня гармонійних спотворень негативно позначається на стані його ізоляції. Додаткове нагрівання прискорює фізико-хімічні процеси старіння ізоляційних матеріалів, зменшує їхню механічну міцність і погіршує діелектричні характеристики. За наявності внутрішніх дефектів, повітряних включень, забруднень або зволоження ізоляції гармонійні перенапруження можуть сприяти підвищенню інтенсивності часткових розрядів.

У процесі виникнення часткових розрядів утворюються локальні електричні заряди, продукти іонізації та нагріті ділянки ізоляційного матеріалу. Їх повторний вплив поступово руйнує структуру діелектрика, спричиняє утворення мікротріщин, електропровідних каналів і локальних дефектів. Унаслідок цього знижується електрична міцність ізоляції, збільшуються діелектричні втрати та ймовірність пробою. Таким чином, несинусоїдальні режими роботи можуть скорочувати фактичний ресурс трансформаторів, кабельних ліній, електричних машин та іншого високовольтного обладнання.

У кабельних мережах із високою щільністю навантаження підвищене теплове та електричне навантаження ізоляції збільшує ризик виникнення однофазних замикань на землю. Гармонійні складові можуть циркулювати через ємності кабельних ліній, заземлювальні пристрої та нейтраль мережі. За несприятливого поєднання індуктивних і ємнісних параметрів можливе виникнення резонансних режимів, які супроводжуються значним збільшенням струмів або напруг окремих гармонік.

Особливу небезпеку становить взаємодія вищих гармонік із конденсаторними батареями та фільтрокомпенсувальними установками. Електричний опір конденсатора зменшується зі збільшенням частоти, тому конденсаторна установка може споживати значний гармонійний струм. Це призводить до перевантаження конденсаторів, підвищення їх температури, збільшення внутрішнього тиску та передчасного виходу з ладу. У разі збігу частоти однієї з гармонік із резонансною частотою мережі рівень відповідної складової може багаторазово зрости.

Несинусоїдальні режими також негативно впливають на асинхронні двигуни. Окремі гармоніки створюють магнітні поля, які обертаються з різними швидкостями та в різних напрямках відносно основного поля. Це спричиняє появу додаткових втрат у статорі й роторі, пульсацій електромагнітного моменту, вібрацій і шуму. Погіршення теплового режиму двигуна прискорює старіння ізоляції обмоток і може призвести до зниження його допустимої потужності.

Підвищений рівень гармонік ускладнює роботу пристроїв релейного захисту, автоматики, керування та промислової мехатроніки. Більшість таких пристроїв визначає діючі, амплітудні або фазові значення електричних величин на основі виміряної форми сигналу. За значного спотворення напруги або струму можливе неправильне визначення нульових переходів, фазових кутів, потужності та послідовності фаз. Це може спричиняти несвоєчасне або помилкове спрацьовування захисту, некоректну роботу систем автоматичного регулювання й аварійне вимкнення технологічного обладнання.

Гармонійні складові також створюють перешкоди в каналах передавання інформації. Вони можуть проникати до сигнальних кіл через спільні джерела живлення, електромагнітний зв’язок, кола заземлення або паралельне прокладання силових і контрольних кабелів. Наслідком стає спотворення аналогових сигналів датчиків, виникнення помилок цифрового обміну, втрата зв’язку між контролерами та неправильне передавання команд до комутаційних апаратів.

Окремою проблемою є зниження точності комерційного й технічного обліку електричної енергії. За синусоїдальної напруги та струму вимірювальні трансформатори і прилади обліку працюють у розрахункових умовах. За наявності значних гармонійних складових їхні амплітудні та фазові похибки можуть збільшуватися. Особливо це стосується обладнання, частотні характеристики якого не розраховані на коректне передавання складових високого порядку.

За рівня сумарного гармонійного спотворення приблизно 7–10 % похибка окремих вимірювальних каналів може ставати суттєвою. При цьому клас точності трансформаторів струму, трансформаторів напруги та приладів обліку, установлений для основної частоти 50 Гц, не завжди гарантує таку саму точність для всього спектра гармонік. Тому під час енергетичного обстеження необхідно використовувати аналізатори якості електроенергії, здатні визначати істинні середньоквадратичні значення та враховувати гармонійний склад сигналів.

У межах проведених досліджень системи електропостачання ПрАТ «Дніпроспецсталь» особливу увагу було приділено гармонікам високого порядку. За результатами вимірювань установлено підвищені рівні 15-ї, 21-ї, 27-ї, 33-ї та 39-ї гармонійних складових. Рівні 27-ї, 33-ї та 39-ї гармонік у багатьох режимах були співставними з рівнем 21-ї гармоніки.

Аналіз результатів показав, що ймовірність перевищення встановлених рівнів для зазначених гармонік є високою. В окремих режимах роботи підприємства спостерігаються значення, які потребують застосування додаткових технічних заходів. При цьому оцінювання відповідності необхідно

виконувати за чинними у 2025 році вимогами ДСТУ EN 50160:2023 та стандартами серії IEC 61000, з урахуванням класу напруги, точки вимірювання та тривалості спостереження.

Під час експериментальних досліджень також було оцінено вплив фільтрокомпенсувальних пристроїв Ф-3 і Ф-5 на гармонійний склад напруги та струму. Отримані результати показали, що наявні фільтри не забезпечують достатнього зниження рівнів 15-ї, 21-ї, 27-ї, 33-ї та 39-ї гармонік. Отже, їхні частотні характеристики, параметри налаштування або встановлена потужність не повною мірою відповідають фактичному спектру гармонійних струмів у сучасних режимах роботи підприємства.

Недостатня ефективність фільтрів може бути пов’язана зі зміною складу електроприймачів, режимів роботи перетворювального обладнання, потужності короткого замикання мережі, параметрів трансформаторів і конфігурації секцій шин. Фільтри, розраховані для попередніх умов експлуатації, після модернізації технологічного обладнання або зміни схеми електропостачання можуть втратити початкову ефективність. Крім того, на їхню роботу впливають фонові спотворення, які надходять із суміжних секцій або зовнішньої мережі.

Оцінювання роботи Ф-3 і Ф-5 як засобів компенсації реактивної потужності також засвідчило їх обмежену ефективність. За відключених фільтрів середня реактивна потужність становила 23 600 квар. Після підключення Ф-3 вона зменшилася до 22 267 квар, тобто на 1 333 квар. За одночасної роботи Ф-3 і Ф-5 реактивна потужність становила 21 200 квар, а загальне зниження порівняно з режимом без фільтрів дорівнювало 2 400 квар.

Наведені результати свідчать, що наявні пристрої забезпечують лише часткову компенсацію реактивного навантаження. Залишкове споживання реактивної потужності залишається значним і спричиняє додаткове завантаження трансформаторів, кабелів і шин. Через це збільшуються струми, втрати активної потужності та падіння напруги у внутрішній електричній мережі підприємства.

Разом із тим оцінювати ефективність фільтрів лише за зменшенням реактивної потужності недостатньо. Необхідно враховувати їхній вплив на коефіцієнт потужності, рівень окремих гармонік, сумарне гармонійне спотворення, напругу на секціях шин, втрати електроенергії та теплове навантаження обладнання. Пристрій може забезпечувати певну компенсацію реактивної потужності, але водночас створювати несприятливі резонансні умови або перевантажуватися гармонійними струмами.

Для визначення причин недостатньої ефективності Ф-3 і Ф-5 необхідно дослідити їх фактичні параметри. Доцільно перевірити ємність конденсаторних батарей, індуктивність реакторів, частоти налаштування, технічний стан комутаційних апаратів, симетрію фазних струмів і температурний режим елементів. Також необхідно визначити фактичну частотну характеристику мережі та можливі резонансні частоти для різних комбінацій увімкнених трансформаторів, кабельних ліній і компенсаційних установок.

За результатами такого обстеження можуть бути запропоновані переналаштування або реконструкція наявних пасивних фільтрів, установлення додаткових фільтрових ланок, застосування детюнованих конденсаторних батарей, активних чи гібридних фільтрів. Для різкозмінного навантаження доцільно також розглянути використання статичних генераторів реактивної потужності або інших швидкодійних компенсувальних пристроїв.

Метою подальшого дослідження є комплексне оцінювання втрат потужності у внутрішній системі електропостачання ПрАТ «Дніпроспецсталь» та визначення впливу гармонійних спотворень і реактивного навантаження на ефективність роботи електрообладнання. Межі дослідження повинні охоплювати ділянку від точки балансової належності підприємства до вводів у виробничі корпуси та безпосередніх вузлів живлення основних електроприймачів.

У процесі роботи необхідно провести тривалі синхронні вимірювання показників якості електричної енергії в характерних точках системи електропостачання копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь». Під час

вимірювань слід реєструвати напруги, струми, активну та реактивну потужності, коефіцієнт потужності, несиметрію, окремі гармонійні складові, сумарне гармонійне спотворення, а також режими ввімкнення і вимкнення фільтрокомпенсувальних пристроїв.

Одержані результати дадуть змогу оцінити ефективність Ф-3 і Ф-5, визначити джерела найбільш значних гармонік, розрахувати додаткові втрати в трансформаторах, кабельних лініях та електродвигунах і встановити вплив несинусоїдальних режимів на пропускну здатність внутрішньої мережі. На цій основі можуть бути розроблені технічні рекомендації щодо нормалізації показників якості електроенергії, зменшення реактивного навантаження, підвищення коефіцієнта потужності та скорочення технологічних втрат електроенергії.

Реалізація запропонованих заходів має забезпечити зниження навантаження на трансформатори й кабельні лінії, поліпшення теплового режиму обладнання, підвищення точності систем обліку, зменшення кількості помилкових спрацьовувань захисту та збільшення строку служби ізоляції. У підсумку це сприятиме підвищенню надійності й енергоефективності системи електропостачання ПрАТ «Дніпроспецсталь».

2.2 Класифікація основних чинників, які мають вплив на продуктивність асинхронного двигуна під час живлення електроенергією низької якості

Електромеханічне обладнання, що входить до складу промислових електроприводів, проєктується для роботи за умов живлення симетричною трифазною напругою синусоїдальної форми з номінальним діючим значенням і сталою частотою. Саме за таких параметрів забезпечуються розрахункові значення електромагнітного моменту, частоти обертання, коефіцієнта корисної

дії, коефіцієнта потужності та температури нагрівання обмоток електричної машини.

Відхилення показників якості електричної енергії від установлених нормативних значень призводить до зміни електромагнітних і теплових процесів у двигуні. Унаслідок цього фактичні режими роботи електропривода відрізняються від номінальних. Навіть за незмінного механічного навантаження можуть зростати струми в обмотках статора і ротора, збільшуватися втрати активної потужності, виникати пульсації електромагнітного моменту, вібрації, підвищений шум і локальне перегрівання окремих елементів машини.

За значного погіршення якості напруги нормальна робота електрообладнання стає неможливою або може підтримуватися лише шляхом зниження навантаження. Це особливо важливо для асинхронних двигунів, які широко застосовуються в приводах насосів, вентиляторів, компресорів, конвеєрів, димососів, прокатних механізмів та іншого технологічного обладнання. Зменшення допустимого навантаження двигуна безпосередньо впливає на продуктивність агрегату та може спричинити порушення встановленого технологічного режиму.

Результати досліджень роботи асинхронних двигунів за наявності відхилень напруги, несиметрії, гармонічних спотворень і коливань частоти свідчать про погіршення їхніх енергетичних та експлуатаційних характеристик. Знижується коефіцієнт корисної дії, збільшується споживання реактивної потужності, погіршується коефіцієнт потужності, зростають електричні й магнітні втрати. Одночасно зменшується надійність електропривода та підвищується ймовірність аварійного відключення двигуна.

Особливо небезпечним є тривале перевищення допустимої температури обмоток. Тепловий стан асинхронного двигуна визначається співвідношенням між втратами енергії, які перетворюються на тепло, та інтенсивністю відведення цього тепла в навколишнє середовище. Погіршення якості напруги збільшує втрати в обмотках, сталі магнітопроводу та короткозамкненій клітці ротора.

Якщо система охолодження не здатна відвести додаткове тепло, температура активних частин машини підвищується.

На багатьох промислових підприємствах заходи з нормалізації якості електроенергії оцінюються переважно за прямими капітальними витратами. Установлення активних фільтрів, симетрувальних пристроїв, компенсаторів реактивної потужності, стабілізаторів, сучасних перетворювачів частоти та систем безперервного моніторингу потребує значних інвестицій. Через це іноді формується уявлення, що економічно вигідніше експлуатувати обладнання в несприятливих режимах і періодично замінювати пошкоджені електродвигуни, ніж упроваджувати комплексні засоби покращення якості електроенергії.

Проте такий підхід не враховує всіх непрямих втрат. До них належать витрати на позапланові ремонти, демонтаж і монтаж двигунів, придбання запасних частин, оплату праці ремонтного персоналу, технологічні простої, зниження обсягів виробництва та погіршення якості готової продукції. Додатковими наслідками можуть бути пошкодження механізму, який приводиться в рух, порушення роботи систем автоматизації та виникнення аварійних ситуацій у суміжних технологічних установках.

Економічна доцільність упровадження заходів із нормалізації якості електроенергії повинна визначатися не лише шляхом порівняння вартості фільтра або компенсувального пристрою з ціною нового двигуна. Необхідно враховувати повну вартість життєвого циклу електропривода, обсяг додаткових втрат електроенергії, тривалість простоїв, витрати на технічне обслуговування та ймовірність виникнення аварій. Для потужних і відповідальних електроприводів навіть одне аварійне зупинення може спричинити збитки, які перевищують витрати на модернізацію системи електропостачання.

На ефективність роботи асинхронного двигуна за умов неякісного електропостачання впливає значна кількість взаємопов’язаних факторів. До них належать рівень і тривалість відхилення напруги, несиметрія фазних напруг, гармонічний склад, частота та глибина провалів, наявність перенапруг, коливання частоти, характер механічного навантаження, потужність двигуна,

спосіб його пуску, умови охолодження, клас ізоляції та фактичний технічний стан.

Систематизацію основних факторів, які впливають на енергетичну ефективність, надійність і строк служби асинхронного двигуна під час живлення електроенергією неналежної якості, наведено на рисунку 2.1. Усі фактори доцільно розподілити на зовнішні та внутрішні. До зовнішніх належать характеристики електричної мережі й механічного навантаження, а до внутрішніх — конструктивні параметри двигуна, стан його ізоляції, системи вентиляції, підшипникових вузлів і магнітопроводу.

Одним із найбільш поширених порушень є відхилення діючого значення напруги. У разі її зниження зменшується магнітний потік і електромагнітний момент двигуна. Для підтримання заданого механічного навантаження двигун збільшує ковзання та споживає більший струм. Це призводить до зростання втрат у міді обмоток і підвищення температури.

Підвищення напруги також не можна вважати сприятливим режимом. У цьому випадку збільшується магнітний потік, а магнітопровід може наближатися до насичення. Унаслідок цього різко зростає струм намагнічування, збільшуються втрати в сталі, посилюється шум і підвищується температура статора. Тривала робота за підвищеної напруги прискорює теплове старіння ізоляції.

Діюче значення напруги визначається з урахуванням усієї фактичної форми кривої, тобто як основної частоти, так і наявних гармонічних складових. Водночас під час аналізу якості електроенергії окремо визначають діюче значення складової основної частоти та рівні вищих гармонік. Такий розподіл дає змогу відокремити вплив зміни амплітуди основної гармоніки від впливу несинусоїдальності напруги.

У трифазній мережі напруга основної частоти може бути представлена у вигляді складових прямої, зворотної та нульової послідовностей. За симетричного режиму переважає складова прямої послідовності, яка створює основне обертове магнітне поле двигуна. Складова зворотної послідовності

утворює поле, що обертається у протилежному напрямку. Відносно ротора це поле має підвищену частоту, тому навіть незначна несиметрія напруги може викликати значні додаткові струми та інтенсивне нагрівання ротора.

Несиметрія напруги призводить до нерівномірного розподілу струмів у фазах статора. В одній або двох фазах струм може суттєво перевищувати номінальне значення, навіть якщо середня споживана потужність не збільшується. Це спричиняє локальне перегрівання обмоток, зменшення допустимого навантаження двигуна, пульсації моменту та прискорене старіння ізоляції.

Наявність вищих гармонічних складових також змінює характер електромагнітних процесів. Окремі гармоніки утворюють поля прямої або зворотної послідовності, які обертаються з різними швидкостями. Їх взаємодія з ротором викликає додаткові втрати, паразитні моменти, механічні вібрації та акустичний шум. Вищі гармоніки збільшують поверхневий ефект у провідниках, втрати від вихрових струмів та нагрівання магнітопроводу.

Негативний вплив мають також провали та короткочасні переривання напруги. Під час провалу електромагнітний момент двигуна різко зменшується, внаслідок чого його частота обертання може знизитися. Після відновлення напруги двигун споживає значний струм, необхідний для повторного розгону. Одночасний самозапуск великої кількості двигунів здатний спричинити повторне зниження напруги та ускладнити відновлення нормального режиму системи електропостачання.

Коливання напруги викликають періодичні зміни струму, електромагнітного моменту та частоти обертання. Для механізмів із підвищеними вимогами до стабільності швидкості це може призвести до порушення технологічного процесу. У приводах насосів і вентиляторів змінюється продуктивність, у прокатних механізмах — швидкість переміщення металу, а в компресорних установках — тиск і подача.

Відхилення частоти електричної мережі впливає на синхронну частоту обертання магнітного поля асинхронного двигуна. Зменшення частоти за

незмінної напруги призводить до збільшення відношення напруги до частоти та може спричинити насичення магнітопроводу. Підвищення частоти, навпаки, зменшує магнітний потік і доступний електромагнітний момент. У централізованих електричних мережах такі відхилення зазвичай є незначними, однак їхній вплив необхідно враховувати в автономних системах живлення.

Надійність асинхронного двигуна значною мірою залежить від стану ізоляції обмоток статора. Ізоляційна система під час експлуатації зазнає одночасного впливу теплових, електричних, механічних і навколишніх факторів. Серед них найбільш істотним за тривалого режиму є теплове старіння. Підвищена температура поступово змінює фізико-хімічні властивості ізоляційних матеріалів, зменшує їхню механічну міцність і електричну стійкість.

Несинусоїдальна напруга додатково підвищує електричне навантаження ізоляції. Імпульсні перенапруги та високі швидкості зміни напруги, характерні для живлення від перетворювачів частоти, можуть спричиняти нерівномірний розподіл напруги між витками обмотки. Це збільшує ймовірність виникнення часткових розрядів, міжвиткових пошкоджень і пробою ізоляції на корпус.

Механічні пульсації моменту, що виникають унаслідок несиметрії та гармонічних спотворень, також впливають на ізоляцію. Вібрації сприяють послабленню кріплення обмоток, стиранню ізоляційного покриття та появі локальних дефектів. За наявності пилу, вологи, високої температури навколишнього середовища або агресивних речовин процес руйнування ізоляції додатково прискорюється.

Таким чином, погіршення якості електричної енергії впливає на асинхронний двигун комплексно. Зміни електричних параметрів викликають додаткові електромагнітні втрати, які переходять у тепло. Підвищена температура прискорює старіння ізоляції, а механічні коливання і вібрації сприяють розвитку локальних пошкоджень. Наслідком є скорочення строку служби двигуна, збільшення кількості ремонтів і зниження надійності всієї технологічної установки.

Для забезпечення ефективної експлуатації асинхронних двигунів необхідно проводити систематичний контроль напруги, несиметрії, гармонічного складу, частоти, провалів і перенапруг. Отримані результати слід зіставляти з температурою обмоток, навантаженням двигуна, рівнем вібрації та характером технологічного режиму. Комплексний аналіз дозволяє своєчасно виявити причини погіршення роботи електропривода та обґрунтувати доцільність упровадження засобів нормалізації якості електроенергії.

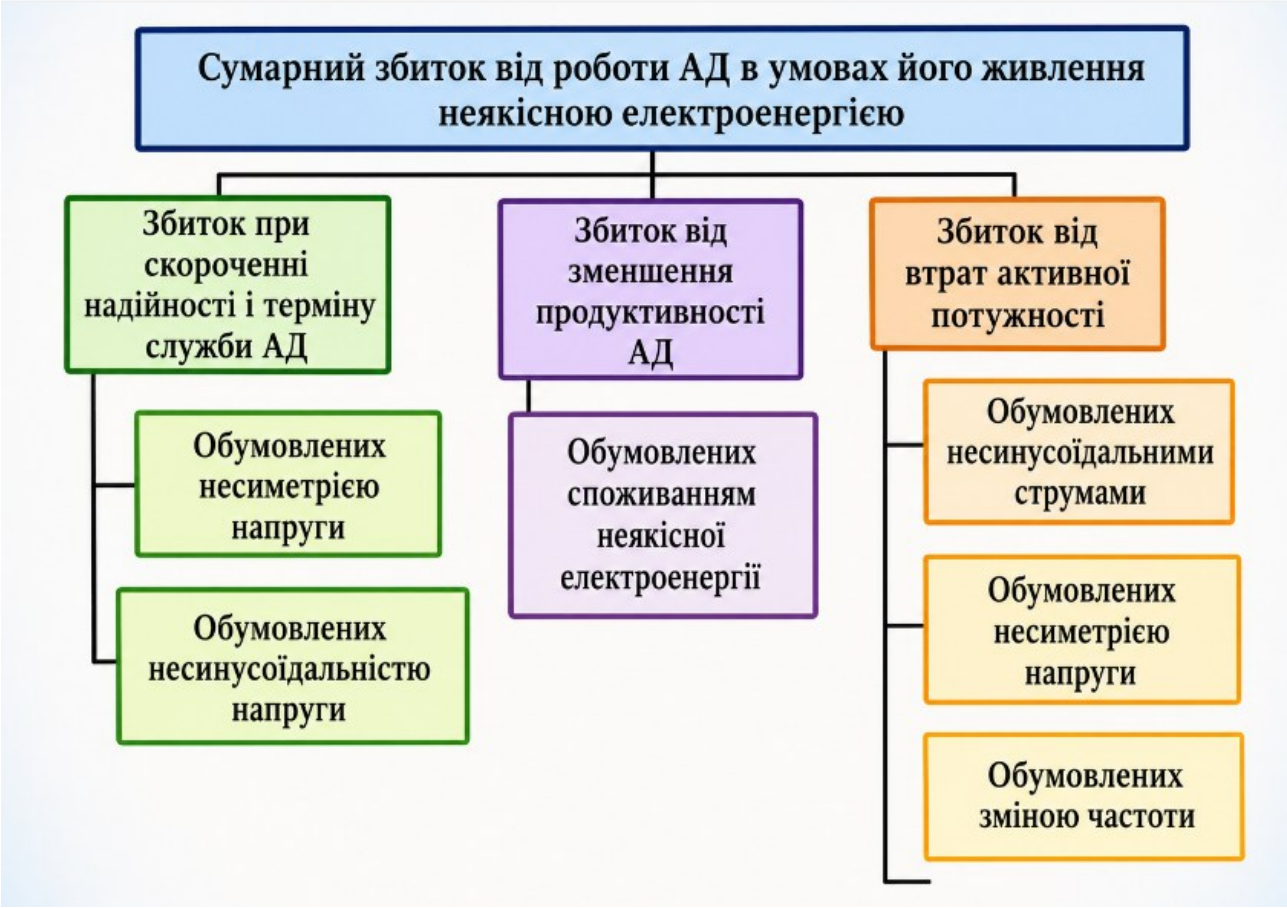


Рисунок 2.1 - Структура і фактори, що впливають на економічний збиток, викликаний роботою АД в умовах його живлення неякісної електроенергією

Розглядаються такі чинники, які призводять до економічних втрат: скорочення терміну служби і надійності асинхронного двигуна, втрати активної потужності та зміна його продуктивності (технологічний збиток).

2.3 Короткий опис алгоритму розрахунку загальних втрат

Втрати через втрату активної потужності можуть бути спричинені: асиметрією напруги; несинусоїдальний струм; шляхом зміни частоти джерела живлення.

Розглянемо кожен з цих показників докладніше. В умовах несиметрії струмів і напруг в елементах системи електропостачання виникають додаткові втрати потужності за рахунок системи зворотних струмів і напруг нульової послідовності. У будь-якому елементі трифазної мережі без нульового проводу додаткові втрати розраховуються за виразом:

$$\Delta \mathrm{E}_{\text{нсм}} = \sum_i T_i \Delta P_{2i}, \tag{2.1}$$

де ΔP_{2i}- втрати активної потужності в елементі системи електропостачання, обумовлені струмами зворотної послідовності;

T_i - час роботи і-го виду обладнання за обліковий період.

Розрахунок ведеться в функції коефіцієнта не симетрії напруги $K_{номU}$,, в вузлі підключення навантаження. Додаткові втрати активної потужності при живлення АД несиметричним напругою можна визначити за такою формулою:

$$\Delta P_{ном} = 2{,}41 \cdot \Delta P_{м,ном} \cdot I_п \cdot K^2_{нсм,U}, \tag{2.2}$$

де $\Delta P_{м,ном}$ - втрати в міді статора при номінальному струмі основної частоти;

I_n - стисліть пускового струму при номінальній напрузі основної частоти.

Застосування формули для розрахунку результуючих додаткових втрат активної потужності в системах електропостачання з великою кількістю АД пов'язані з труднощами. У зв'язку з цим отримано понад простий вислів для таких розрахунків:

$$\Delta P_{\text{ном}} = 2{,}41 \cdot k_{\text{АД}} \cdot P_{\text{ном}} \cdot K^2_{\text{нсм},U}, \tag{2.3}$$

Значення коефіцієнта $k_{\text{АД}}$ для двигунів з номінальною потужністю до 5 кВт знаходяться в діапазоні 3 - 4,5, для двигунів потужністю 5-100 кВт - в діапазоні 1-3, а для двигунів потужністю понад 100 кВт - в діапазоні 0,4-1. Перші значення відносяться до біліше потужним двигунам. значення коефіцієнта $k_{\text{АД}}$ для АД потужності $P_{\text{ном}}$ можна визначити за такою формулою:

$$k_{АД}=k^{н}_{АД}+\frac{(k^{в}_{АД}-k^{н}_{АД})(P^{в}_{ном}-P_{ном})}{P^{в}_{ном}+P^{н}_{ном}}, \quad (2.4)$$

де $k^{\text{н}}_{\text{АД}}$ и $k^{\text{в}}_{\text{АД}}$ - відповідно нижня і верхня межі діапазону $k_{\text{АД}}$;

$\text{Р}^{\text{н}}_{\text{ном}}$ и $\text{Р}^{\text{в}}_{\text{ном}}$ відповідно нижня і верхня межі діапазону номінальних потужностей АД.

Наведені нижче вирази дозволяють розрахувати км для АД різної потужності:

$$k_{АД}=3+0{,}3(5-P);P<5 \text{ кВт}; \quad (2.5)$$

$$k_{АД}=1{,}0+0{,}021(100-P);P=5\div100 \text{ кВт}; \quad (2.6)$$

$$k_{АД}=0{,}4+0{,}0067(1000-P);P<1000 \text{ кВт}. \quad (2.7)$$

При великій кількості АД (кілька сотень) з різною номінальною потужністю $k_{\text{АД}}$ рекомендується визначати в наступному порядку:

а) шкалу номінальних потужностей АД ділять на кілька діапазонів;

б) для кожного діапазону визначають сумарну номінальну потужність АД;

в) для кожного діапазону визначають середнє значення коефіцієнта $k_{\text{АД}}$;

г) визначають значення коефіцієнта κ_m для сумарній номінальній потужності всіх АД:

$$k_{АД\Sigma} = k_{АД1}\frac{P_{ном,1}}{P_{ном,\Sigma}} + k_{АД2}\frac{P_{ном,1}}{P_{ном,\Sigma}} + \ldots + k_{АДn}\frac{P_{ном,1}}{P_{ном,\Sigma}}, \quad (2.8)$$

де n - число діапазонів, на які розбита шкала номінальних потужностей АД.

В системі електропостачання, що містить нелінійні елементи, виникають Несинусоїдальні струми і напруги. Наявність вищих гармонік веде до появи додаткових втрат активної потужності від несинусоїдальних струмів$P_{нс}$і електроенергії $\Delta Э_{нс}$ в елементах систем електропостачання, а також викликає ряд небажаних явищ в мережі живлення.

Додаткові втрати активної потужності в обмотках асинхронного двигуна, обумовлені струмами вищих гармонік, визначають за формулою:

$$P_{нс} = 3\sum_{n=3}^{N} I_n^2 \left(R_{1n} + R_{2n}^{`}\right), \quad (2.9)$$

де $R_{1n}, R_{2n}^{`}$ - активний опір статора і наведене активний опір ротора на частоті n-й гармоніці.

З урахуванням прояви поверхневого ефекту:

$$R_{1n} = R_1\sqrt{n}, \quad (2.10)$$

$$R_{2n}^{`} = R_{2n}^{`}\sqrt{n \pm 1}. \quad (2.11)$$

Для гармонійних струмів n, що утворюють систему прямого порядку, (2.

11) матиме знак плюс, для зворотного порядку - знак мінус.

При використанні середніх параметрів електричної машини практично враховуються додаткові втрати активної потужності в обмотках статора і ротора на струми вищих гармонік. Наявність додаткових втрат активної потужності за рахунок несинусоїдальних струмів в асинхронних двигунах призводить до зниження їх коефіцієнта потужності, ККД і доступної потужності. Більшість

додаткових втрат активної потужності через вищі гармоніки в асинхронних машинах пов'язані з демпфером і компонентами обмотки статора.

В асинхронних двигунах з напругою понад 1 кВ додаткові втрати активної потужності за рахунок вищих гармонік в обмотках статора і ротора однакові. При розрахунках додатковими втратами в сталі статора і ротора від магнітного поля можна знехтувати. Ці поля незначні через контур демпфування в роторі. Додаткові втрати активної потужності в сталі враховуються тільки точними розрахунками. Втрати активної потужності в АД через зміну частоти мережі визначають за виразом:

$$\Delta P_{f,\text{АД}} = \Delta P_{f,\text{ст}} + \Delta P_{f,\text{м}}, \tag{2.12}$$

де $\Delta P_{f,\text{ст}}$ - зміна втрат в стали АД при зміні частоти;

$\Delta P_{f,\text{м}}$ - зміна втрат в металі (міді) обмоток АД при зміні частоти.

Зміна питомих втрат в сталі АД визначають з виразу:

$$\Delta P_{f,\text{ст}} = \frac{\Delta P_{\text{ст,ном}}(0{,}61+0{,}39k_f)}{k_f}, \tag{2.13}$$

де $\Delta P_{\text{ст,ном}}$- питомі втрати в сталі АД при $f=f_{\text{ном}}$. Їх розраховують за формулою:

$$\Delta P_{\text{ст,ном}} = \left[\delta_{\text{г}}\frac{f}{100} + \delta_{\text{в,т}}\left(\frac{f}{100}\right)^2\right]\cdot\left(\frac{B}{1000}\right)^2, \tag{2.14}$$

де B - магнітна індукція в осерді АД, Тл;

$\delta_{\text{г}}$ и $\delta_{\text{в,т}}$ – питомі втрати в сталі на гістерезис і вихрові струми.

При номінальній частоті f =50 Гц для сталі товщиною 0,5 мм $\delta_{\text{г}}$=4,4 Вт/кг і $\delta_{\text{в,т}}$= 5,6 Вт/кг; *кf=f/f* - коефіцієнт відносної частоти.

Втрати в обмотках статора і ротора АД, якщо знехтувати намагнічує струмом, при моменті $M_{\text{с}}$ і зміною частоти рівні:

$$\Delta P_{f,\text{м}} \cong \Delta P_{\text{м,ном}}\text{M}_{\text{с}}k_f^2, \tag{2.15}$$

де $\Delta P_{\text{м,ном}}$ - втрати в обмотках статора і ротора АД при $f=f_{ном}$;

M_c - момент опору механізму. Для механізмів з постійним моментом на валу він дорівнює елетромагнітному моменту АД.

Необхідність використання симетризуючого пристрою визначається на основі вимог до якості електроенергії згідно з ДСТУ 13109-97. Згідно з цими нормами, напруга зворотної послідовності не повинна перевищувати 2% від номінального значення. Формули для оцінки можливості підключення однофазних навантажень наведені в таблиці 3.2.

Симетризуючі пристрої можуть бути керованими або некерованими, і вибір типу пристрою залежить від характеру технологічного процесу установки. Розрахунок необхідної потужності елементів симетризуючого пристрою проводиться для конкретної потужності однофазного навантаження, зазвичай для його максимального значення. Таким чином, параметри симетризуючого пристрою забезпечують симетризацію лише при одному значенні потужності навантаження.

Якщо під час технологічного процесу споживана потужність ЕТУ змінюється, виникає несиметрія струмів і напруг. Ця несиметрія залежить від величини зміни активної потужності навантаження X, яка розраховується як відношення максимальної до мінімальної потужності (повної або активної) під час нагрівання або плавлення:

$$\lambda = \frac{\text{P}_{0\text{ макс}}}{\text{P}_{0\text{ мин}}} = \frac{S_{0\text{ макс}}}{S_{0\text{ мин}}} (cos_u = const). \qquad (2.16)$$

Визначення необхідності використання симетризуючих пристроїв виконується за допомогою формул, наведених у таблиці 2.1. Проте ці критерії можуть бути недостатніми для прийняття рішення про використання симетризуючих пристроїв. У деяких випадках може бути економічно обгрунтованим симетризування однофазного навантаження для зниження несиметрії напруги нижче нормативного рівня.

Таблиця 2.1 - Коефіцієнт несиметрії напруг і умови можливості підключення однофазних навантажень

Характер навантаження	Коефіцієнт несиметрії напруг, α_u	
Однофазна потужність, S_0	$\frac{s_0}{S_{кз}+2{,}67S_з}$	$\frac{v_0 \cdot u_к}{1+2{,}67v_з u_к}$
Дві однофазні (або одна двухфазна) потужності, S_1 і S_2	$\frac{\sqrt{S_{01}^2-S_{01}S_{02}+S_{02}^2}}{S_{кз}+2{,}67S_з}$	$\frac{\sqrt{v_{01}^2-v_{01}v_{02}+v_{02}^2}}{1+2{,}67v_з u_к}$

Для однофазної печі ІЧТ-40 визначаємо коефіцієнт несиметрії:

$$K_{нсм,\ U}=\frac{S_{0\ max}\left(1-\frac{1}{\lambda}\right)}{S_{кз}+2{,}67S_з}\cdot 100\%, \qquad (2.17)$$

де $S_{ном}$ - максимальна споживана потужність в процесі плавки; $S_{ном}$=9150 кВА;

λ = $S_{мах}$/Smin= 2,4 - діапазон зміни потужності в процесі плавки; Sз =12050 кВА - потужність 3-фазного навантаження; $S_{кз}$=114440 кВА - потужність к.з. в точці підключення ІЧТ-40 до мережі (шини РП-6 кВ).

$$K_{нсм,\ U}=\frac{9150\left(1-\frac{1}{2{,}4}\right)}{114440+2{,}67\cdot 12050}\cdot 100=3{,}64\%>K_{нсм,\ Uдоп}=2\%. \qquad (2.18)$$

2.4 Вивчення впливу параметрів якості електроенергії на роботу асинхронного двигуна

Для комплексної оцінки впливу асиметрії та несинусоїдальності напруги на технічні характеристики асинхронного двигуна була розроблена математична модель та створена експериментальна установка (рисунок 2.2).

Технічні характеристики обладнання:

Асинхронний двигун 4АХ80А4У3; $P_{ном}$=1,1 кВт; $U_{ном}$=380 В; $I_{ном}$=2,8 А; $\cos\varphi_{ном}$=0,81; $n_{ном}$=1400 об/хв.; $\eta_{ном}$=0,75.

Генератор П31; $P_{ном}$=1 кВт; $U_{ном}$=230 В; $I_{ном}$=4,35 А; $n_{ном}$=1450 об/хв.; $\eta_{ном}$=0,75.

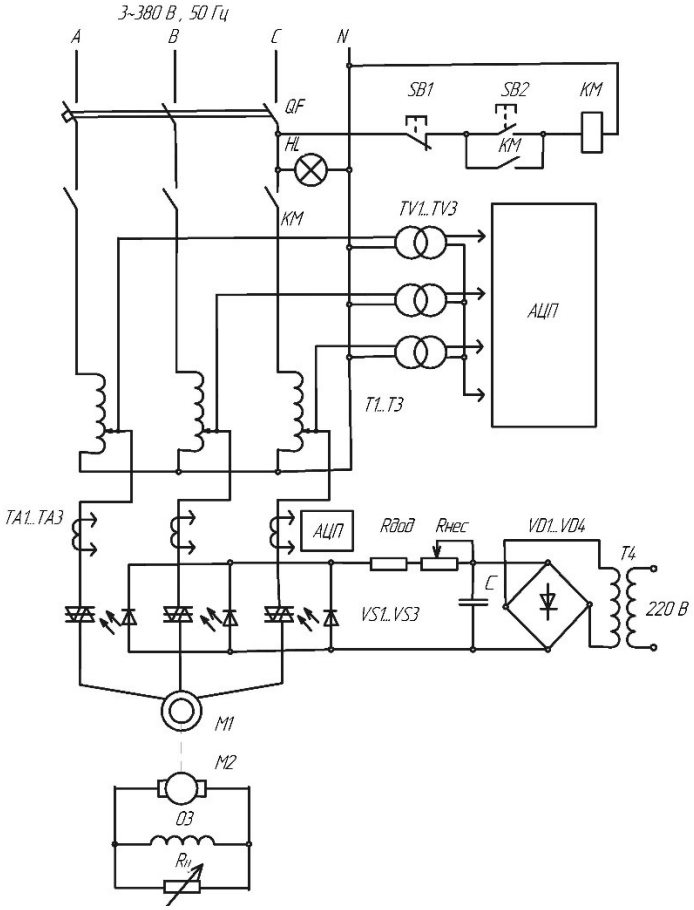


Рисунок 2.2 - Електрична принципова схема експериментально-дослідної установки

Навантажувальним пристроєм для асинхронного двигуна М1 у розробленій експериментальній установці слугує генератор постійного струму паралельного збудження М2. Застосування такого генератора дає змогу плавно змінювати механічне навантаження на валу досліджуваного двигуна та відтворювати різні режими його роботи — від холостого ходу до номінального

й підвищеного навантаження. Завдяки цьому забезпечується можливість комплексного дослідження енергетичних, електромагнітних і механічних характеристик асинхронного двигуна за різних показників якості напруги живлення.

Штучне створення несиметрії трифазної системи напруг здійснюється за допомогою трьох лабораторних автотрансформаторів T1–T3. Кожний автотрансформатор підключений до відповідної фази мережі та забезпечує незалежне регулювання діючого значення фазної напруги. Змінюючи положення регулювального органу одного або декількох автотрансформаторів, можна отримувати задані значення відхилення напруги в окремих фазах і формувати різні ступені несиметрії. Така схема дає можливість досліджувати роботу асинхронного двигуна як за незначної несиметрії, характерної для реальних промислових мереж, так і за суттєвіших відхилень, що можуть виникати в аварійних або ненормальних режимах електропостачання.

Несинусоїдальність напруги живлення формується за допомогою оптосимисторів VS1–VS3, установлених у кожній фазі. Керування кутом відкривання оптосимисторів здійснюється регулювальним резистором Rнес. Зміна моменту відкривання напівпровідникових елементів призводить до спотворення форми синусоїдальної кривої напруги та появи у її спектрі вищих гармонічних складових. У такий спосіб на лабораторній установці відтворюються режими живлення, характерні для промислових мереж із великою кількістю нелінійних споживачів, зокрема перетворювачів частоти, випрямлячів, електродугових установок, тиристорних регуляторів і зварювального обладнання.

Збирання та передавання експериментальних даних до комп’ютера здійснюється за допомогою комплексу вимірювальних перетворювачів. Значення фазних напруг реєструються через вимірювальні трансформатори напруги TV1–TV3, а фазні струми — через трансформатори струму TA1–TA3. Аналогові сигнали з виходів вимірювальних трансформаторів надходять до аналого-цифрового перетворювача, де перетворюються на цифровий код і

передаються до комп’ютерної системи оброблення даних. Використання АЦП забезпечує можливість одночасної реєстрації миттєвих значень напруг і струмів, побудови їхніх часових діаграм, визначення спектрального складу та розрахунку основних енергетичних показників двигуна.

Наявність у вимірювальному каналі трансформаторів напруги та струму неминуче спричиняє додаткову похибку. Вона пов’язана з похибками коефіцієнта трансформації, кутовими похибками, нелінійністю магнітних характеристик осердя, втратами в обмотках, впливом навантаження вторинних кіл і частотною залежністю характеристик вимірювальних трансформаторів. Особливо помітним вплив цієї похибки стає за малих відхилень показників якості електричної енергії від установлених допустимих значень. У такому випадку абсолютна похибка вимірювального каналу може бути порівнянною з величиною самого контрольованого відхилення, що ускладнює достовірне оцінювання результатів.

Для зниження похибки вимірювання та наближення режиму роботи трансформаторів струму до їхніх номінальних умов вторинні кола ТА1–ТА3 були додатково навантажені. Правильний вибір навантаження дає змогу зменшити відхилення коефіцієнта трансформації, підвищити точність відтворення форми струму та знизити фазовий зсув між первинним і вторинним сигналами. Це має особливе значення під час визначення активної, реактивної та повної потужності, коефіцієнта потужності, а також під час гармонічного аналізу струмів.

У процесі проведення експериментів контролювалися основні електричні, механічні й енергетичні параметри асинхронного двигуна. До них належали активна потужність, споживана двигуном у кожній фазі, значення фазних струмів, електромагнітний і механічний обертовий момент, частота обертання ротора, коефіцієнт корисної дії та коефіцієнт потужності. Додатково аналізувалися відхилення фазних напруг, ступінь їхньої несиметрії, гармонічний склад напруг і струмів, а також зміни втрат активної потужності за різних режимів навантаження.

Пофазне вимірювання потужності є особливо важливим за несиметричного режиму, оскільки в цьому випадку навантаження окремих фаз двигуна стає неоднаковим. Струми в обмотках можуть суттєво відрізнятися навіть за порівняно невеликої несиметрії напруги. Це призводить до нерівномірного теплового навантаження фаз, появи струмів зворотної послідовності та додаткових втрат у статорі й роторі. Тому оцінювання тільки сумарної трифазної потужності не дає повного уявлення про фактичний стан двигуна.

Результати експериментальних досліджень показали, що незначна несиметрія напруги відносно слабко впливає на частоту обертання ротора та середнє значення обертового моменту. Це пояснюється тим, що механічна характеристика асинхронного двигуна в межах робочої ділянки є досить жорсткою, тому невеликі зміни напруги не спричиняють різкого зниження швидкості. Водночас відсутність помітного зменшення частоти обертання не означає, що двигун працює без негативних наслідків.

Найсуттєвіше несиметрія напруги позначається на величині струмів, додаткових електричних втратах і тепловому стані двигуна. У несиметричній трифазній системі виникає складова напруги зворотної послідовності, яка створює магнітне поле, що обертається у напрямку, протилежному до обертання ротора. Відносна швидкість цього поля щодо ротора є значною, тому в роторі наводяться струми підвищеної частоти. У результаті збільшуються втрати в обмотках статора і ротора, зростає температура активних частин двигуна, посилюються вібрації та погіршуються умови роботи підшипникових вузлів.

Тривала робота за несиметричної напруги може призвести до локального перегрівання окремих фаз обмотки статора. При цьому середня температура двигуна може залишатися в допустимих межах, однак температура найбільш навантаженої фази буде значно вищою. Така нерівномірність нагрівання прискорює старіння електричної ізоляції, знижує її механічну та електричну міцність і скорочує фактичний строк служби двигуна. Отже, оцінювати вплив несиметрії тільки за зміною частоти обертання або моменту недостатньо —

необхідно обов’язково враховувати струмове навантаження, втрати та тепловий стан машини.

Ще істотніший вплив на характеристики асинхронного двигуна чинять вищі гармонічні складові напруги. За живлення двигуна несинусоїдальною напругою кожна гармоніка створює власне магнітне поле. Частина цих полів обертається в напрямку основного поля, а частина — у протилежному напрямку. Унаслідок цього виникають додаткові електромагнітні моменти, пульсації моменту, механічні коливання та підвищений акустичний шум.

Гармонічні складові також збільшують діючі значення струмів у фазах двигуна. При цьому корисна механічна потужність на валу практично не зростає, а додаткова електрична енергія витрачається переважно на нагрівання обмоток і магнітопроводу. Збільшуються втрати в міді статора і ротора, втрати на гістерезис і вихрові струми, а також додаткові поверхневі втрати. Через прояв поверхневого ефекту та ефекту близькості активний опір провідників для струмів підвищеної частоти є більшим, ніж для основної гармоніки.

Погіршення форми напруги призводить до зниження коефіцієнта потужності асинхронного двигуна. Це пояснюється тим, що повна потужність зростає внаслідок збільшення діючого значення несинусоїдального струму, тоді як активна складова потужності змінюється меншою мірою. Крім того, частина гармонічних складових струму не бере участі у створенні корисного обертового моменту. Унаслідок цього знижується ефективність використання електричної енергії, збільшується навантаження на мережу та зростають втрати в кабелях і трансформаторах.

Експериментально встановлено, що за наявності у напрузі значних п’ятої та сьомої гармонік коефіцієнт потужності двигуна може істотно зменшуватися. Зокрема, якщо амплітуда п’ятої гармоніки становить приблизно 20 % амплітуди основної гармоніки, а амплітуда сьомої — близько 15 %, коефіцієнт потужності двигуна може знизитися до 25 % порівняно з режимом живлення синусоїдальною напругою. Таке зниження свідчить про суттєве збільшення непродуктивної складової струму та погіршення енергетичних показників електропривода.

П’ята гармоніка напруги утворює магнітне поле зворотної послідовності та створює гальмівний електромагнітний момент. Сьома гармоніка формує поле прямої послідовності, однак швидкість його обертання відрізняється від швидкості основного поля. Спільна дія цих складових викликає пульсації результуючого моменту, які можуть передаватися на механічну частину електропривода. За певних умов це спричиняє додаткові вібрації, резонансні явища, прискорене зношування муфт, підшипників і робочого механізму.

Якщо рівні гармонічних складових не перевищують установлених нормативних меж, їхній вплив на середній обертовий момент і коефіцієнт потужності зазвичай залишається відносно невеликим. За результатами досліджень зміна моменту за таких умов може не перевищувати приблизно 0,5 % від моменту, створюваного основною гармонікою напруги. Проте навіть за невеликого впливу на механічні характеристики вищі гармоніки можуть поступово погіршувати тепловий та ізоляційний стан електричної машини.

Особливо небезпечним є тривалий вплив гармонічних складових на систему ізоляції обмоток. Підвищення частоти та спотворення форми напруги збільшують діелектричні втрати в ізоляційних матеріалах. У неоднорідностях ізоляції, повітряних включеннях, мікротріщинах і зазорах можуть виникати процеси локальної іонізації та часткові розряди. Під їхньою дією поступово руйнується структура діелектрика, утворюються провідні канали, збільшуються локальні дефекти та зменшується електрична міцність ізоляції.

Додаткове нагрівання, спричинене вищими гармоніками, прискорює термічне старіння ізоляційних матеріалів. Спільна дія підвищеної температури, електричного поля, вібрації та часткових розрядів істотно скорочує ресурс обмоток. У результаті зростає ймовірність міжвиткових замикань, пробою ізоляції на корпус і передчасного виходу двигуна з ладу. Саме тому під час оцінювання впливу несинусоїдальності необхідно враховувати не лише миттєві зміни моменту або частоти обертання, а й довготривалий вплив на надійність електричної машини.

Вплив несиметрії та несинусоїдальності значною мірою залежить від коефіцієнта завантаження двигуна. За малих навантажень двигун має певний тепловий резерв, однак його коефіцієнт потужності та ККД є зниженими. У цьому режимі додаткові гармонічні струми можуть становити значну частину загального струму. За навантаження, близького до номінального, навіть невелике збільшення струму внаслідок несиметрії або гармонік може призвести до перевищення допустимої температури обмоток.

У перевантажених режимах негативний вплив неякісної електроенергії посилюється. Зростання струму викликає квадратичне збільшення втрат у міді, тому одночасна дія механічного перевантаження, несиметрії та несинусоїдальності може спричинити швидке перегрівання двигуна. За таких умов зменшуються ККД і коефіцієнт потужності, підвищується ковзання, зростає амплітуда пульсацій моменту та погіршується стійкість роботи електропривода.

Таким чином, проведені дослідження підтверджують, що якість напруги живлення є одним із визначальних чинників надійної та енергоефективної роботи асинхронного двигуна. Незначна несиметрія може майже не позначатися на частоті обертання, але водночас спричиняти суттєве збільшення струмів, втрат і температури обмоток. Вищі гармонічні складові погіршують коефіцієнт потужності, знижують корисний момент, збільшують втрати, викликають пульсації моменту та прискорюють старіння ізоляції.

Результати експериментів для різних коефіцієнтів завантаження асинхронного двигуна наведено на рисунках 2.3–2.5. Представлені залежності дають змогу оцінити зміну струмів, потужності, моменту, частоти обертання, коефіцієнта корисної дії та коефіцієнта потужності за різних рівнів несиметрії й несинусоїдальності напруги. Отримані дані можуть бути використані для визначення допустимих режимів роботи електродвигунів, обґрунтування необхідності зниження їхнього навантаження, вибору засобів нормалізації якості електроенергії та розроблення систем безперервного контролю технічного стану електропривода.

Дослідження різних коефіцієнтів навантаження AD дають наступні результати (рис. 2.3, 2.4, 2.5).

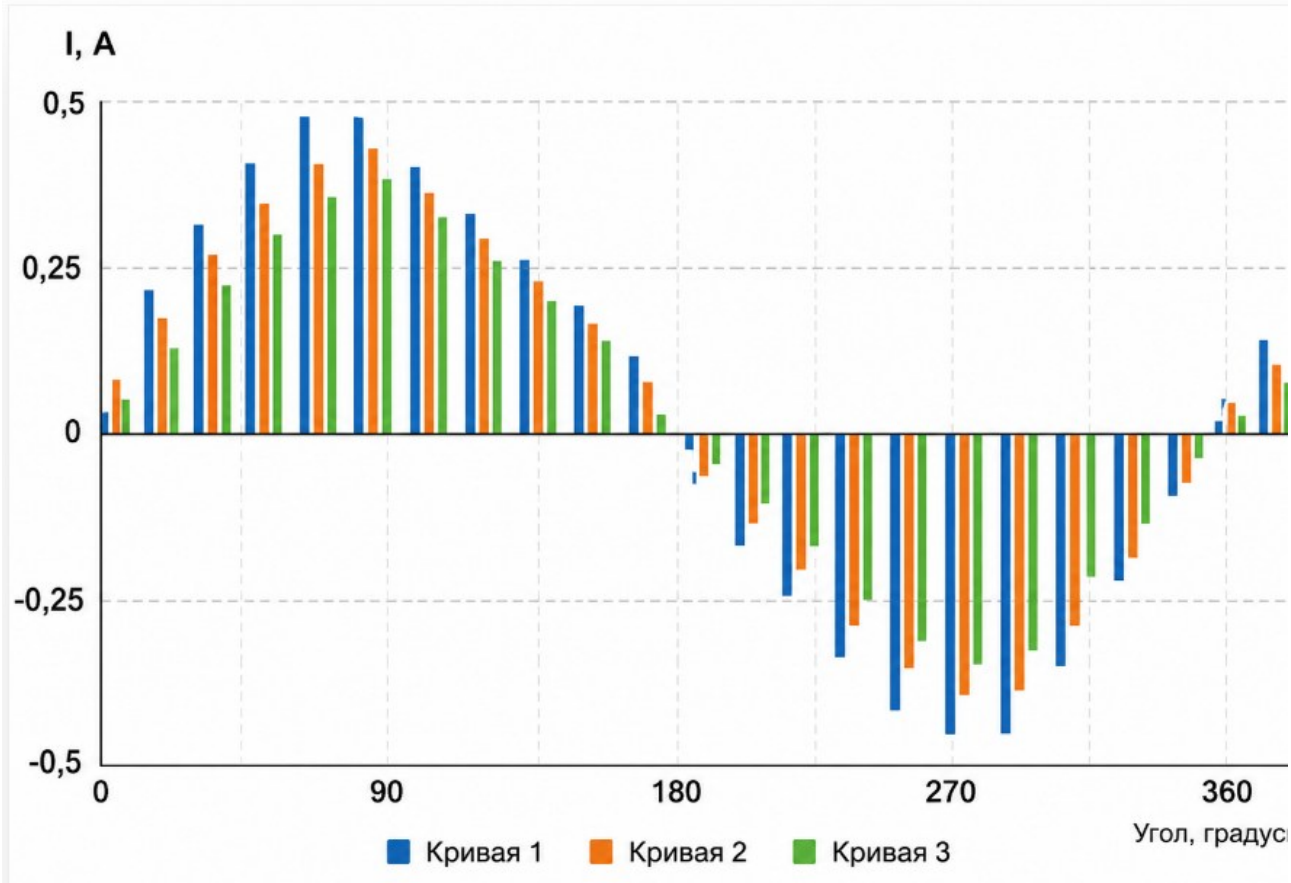


Рисунок 2.3 - Результати дослідження АД при різних значеннях несинусоїдальності та несиметрії і коефіцієнті завантаження $К_з$=0.

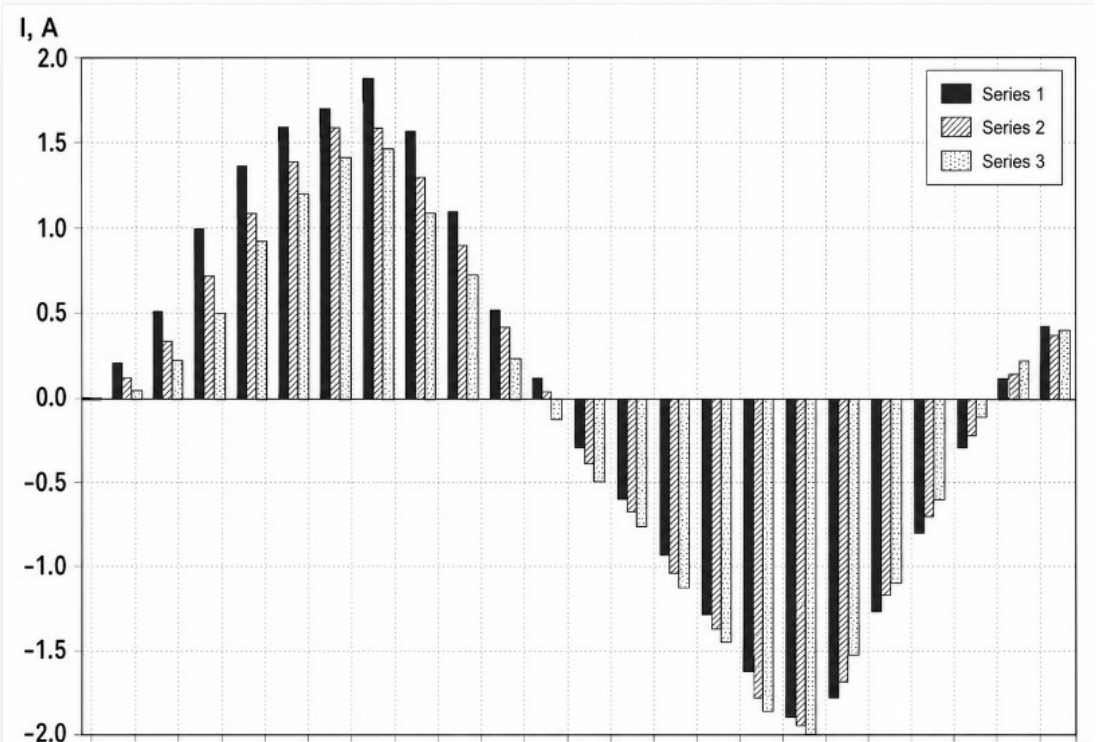


Рисунок 2.4 - Результати дослідження АД при різних значеннях несинусоїдальності та несиметрії і коефіцієнті завантаження $К_з$=0,5.

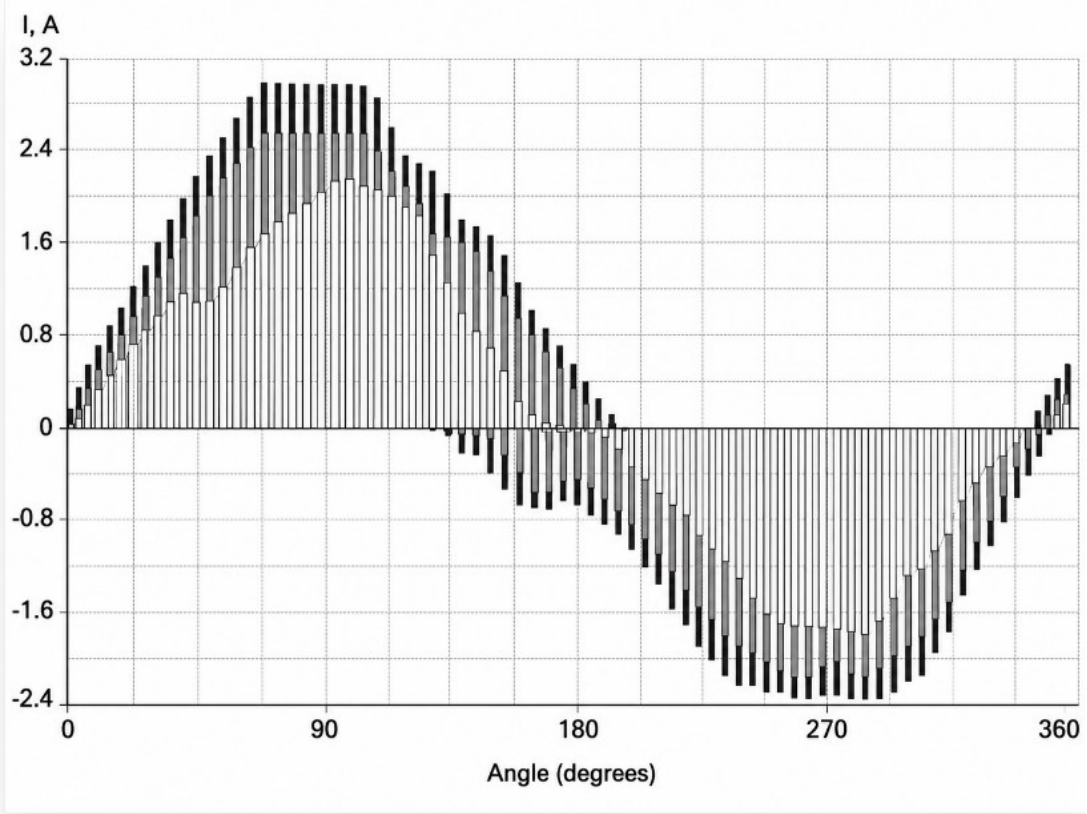


Рисунок 2.5 - Результати дослідження АД при різних значеннях несинусоїдальності та несиметрії і коефіцієнті завантаження $К_з$=1.

Аналізуючи отримані графіки, можна скласти електричні рівняння залежностей $M, n_2, \eta=f(K_{2U}, K_U)$, які є цільовими функціями. Завдяки нелінійному характеру перемагнічування АД коефіцієнти несинусоїдальності по напрузі та струму неоднакові. Для отримання комплексного впливу несиметрії та несинусоїдальності напруг на технічні характеристики АД був поставлений плановий експеримент за методом Бокса-Уїлсона, який має вигляд $f(x_1, x_2)=a_0+a_1x_1+a_2x_2+a_3x_1x_2$. Експеримент дав наступні залежності за різних коефіцієнтах завантаження ($К_з$).

$К_з$=0,5:

$$n_2=1415-15,75\ К_{2U} - 5,75\ К_U + 0,75\ К_{2U}\ К_U;$$

$$M=5,95-0,0875\ К_{2U} - 0,0525\ К_U + 0,0125\ К_{2U}\ К_U;$$

$$\eta=63,8-4,625\ К_{2U} - 2,125\ К_U + 0,325\ К_{2U}\ К_U.$$

$К_з$=1:

$$n_2=1400-26,5\ К_{2U} - 11,5\ К_U + 3,5\ К_{2U}\ К_U;$$

$$M=7,5-0,2\ К_{2U} - 0,06\ К_U + 0,015\ К_{2U}\ К_U;$$

$$\eta=75-5,65\ К_{2U} - 3,15\ К_U + 0,15\ К_{2U}\ К_U.$$

Отже, важливо досліджувати технічні характеристики як для асинхронного двигуна, так і для іншого електроустаткування, при відхиленні від нормально-допустимого значення не лише одного показника якості електроенергії, а в комплексі. Цільові функції $M, n_2, \eta=f(K_{2U}, K_U)$ залежать від завантаження АД та його типу і тому не можуть бути уніфікованими. Точність вимірювань технічних характеристик асинхронного двигуна залежить від величини відхилення показників якості електроенергії від нормально-допустимих значень.

3 ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ ВАРІАНТІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПРАТ «ДНІПРОСПЕЦСТАЛЬ»

3.1 Обґрунтування доцільності впровадження заходів зі зниження споживання реактивної енергії

У межах техніко-економічного обґрунтування заходів, спрямованих на підвищення ефективності роботи копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь», необхідно комплексно враховувати як технічні, так і економічні чинники. Такий підхід дає змогу оцінити не лише можливість реалізації запропонованих заходів, а й доцільність їхнього впровадження з погляду витрат, очікуваної економії та впливу на виробничі показники підприємства.

Технічна частина розрахунків передбачає аналіз чинного стану електротехнічного обладнання, режимів його роботи, рівня завантаження, надійності, енергоефективності та відповідності сучасним вимогам. Особливу увагу доцільно приділяти стану систем електропостачання, електроприводів, трансформаторного обладнання, компенсувальних установок, а також допоміжних механізмів, що забезпечують роботу копрового цеху. Оцінювання фактичних режимів роботи дає змогу визначити найбільш енергоємні та проблемні ділянки виробництва, а також встановити причини підвищених втрат електричної енергії.

Економічна частина техніко-економічних розрахунків охоплює визначення капітальних і поточних витрат, пов’язаних із реалізацією запропонованих заходів. До складу капітальних витрат можуть входити вартість нового обладнання, його транспортування, монтаж, налагодження, проєктні роботи та підготовка виробничих приміщень. Поточні витрати включають витрати на технічне обслуговування, ремонт, оплату електроенергії, заробітну плату персоналу, витратні матеріали та інші експлуатаційні потреби.

Одним із важливих напрямів оцінювання є визначення потреби копрового цеху в енергетичних ресурсах. Для цього аналізуються фактичні обсяги споживання активної та реактивної електроенергії, максимальні навантаження, графіки роботи основного обладнання, коефіцієнти потужності та втрати в елементах системи електропостачання. Отримані результати дають змогу оцінити потенціал енергозбереження та визначити технічні заходи, реалізація яких забезпечить найбільший економічний ефект.

У процесі обґрунтування модернізації необхідно також оцінити прогнозовану ефективність застосування нових технологій. Це може передбачати впровадження сучасних електроприводів, автоматизованих систем керування, енергоефективних електродвигунів, пристроїв компенсації реактивної потужності, засобів моніторингу якості електроенергії та систем обліку енергоресурсів. Для кожного технічного рішення доцільно визначати очікуване зниження енергоспоживання, скорочення втрат, підвищення продуктивності та зменшення витрат на ремонт і технічне обслуговування.

Техніко-економічні розрахунки можуть також включати оцінювання екологічного ефекту від реалізації заходів. Зменшення споживання електричної енергії та палива сприяє скороченню непрямих викидів забруднювальних речовин і парникових газів. Крім того, модернізація обладнання може забезпечити зниження рівня шуму, вібрації, запиленості та теплових викидів у виробничих приміщеннях. Таким чином, енергоефективні заходи мають не лише економічне, а й екологічне та соціальне значення.

На основі отриманих розрахункових даних виконується порівняння декількох варіантів реконструкції. Кожен варіант оцінюється за сукупністю показників, серед яких розмір початкових капіталовкладень, річна економія електроенергії, зниження експлуатаційних витрат, строк окупності, чистий дисконтований дохід, індекс рентабельності та внутрішня норма доходності. Такий аналіз дозволяє вибрати рішення, яке забезпечує найкраще співвідношення між витратами та очікуваним результатом.

Важливим етапом є аналіз ризиків, пов’язаних із реалізацією заходів. До них можуть належати зростання вартості обладнання, затримки постачання, зміна тарифів на електроенергію, недостатній фактичний рівень економії, технічна несумісність нового обладнання з чинною системою та можливі простої під час монтажу. Урахування таких факторів підвищує достовірність розрахунків і дає змогу заздалегідь розробити заходи щодо зниження потенційних ризиків.

Проведення техніко-економічного аналізу дозволяє керівництву підприємства приймати обґрунтовані рішення щодо доцільності модернізації копрового цеху. Розрахунки показують, який із запропонованих заходів забезпечить найбільше зниження витрат, підвищення продуктивності та скорочення строку окупності. Це особливо важливо в умовах зростання вартості енергоресурсів і необхідності підвищення конкурентоспроможності металургійного виробництва.

Окреме місце в техніко-економічному обґрунтуванні посідає оцінка ефективності компенсації реактивної потужності. Значна кількість електроприймачів копрового цеху, насамперед асинхронні двигуни, трансформатори, зварювальні установки та інше індуктивне обладнання, споживає не лише активну, а й реактивну потужність. Її циркуляція в мережі призводить до збільшення повного струму, додаткових втрат у кабельних лініях і трансформаторах, зниження пропускної здатності мережі та погіршення рівня напруги.

Для зниження реактивного навантаження в системі електропостачання застосовуються фільтрокомпенсувальні пристрої. Їхнє призначення полягає не лише в компенсації реактивної потужності, а й у зменшенні рівня вищих гармонік струму та напруги. Це особливо важливо для промислових мереж, у яких працюють нелінійні електроприймачі, здатні істотно спотворювати форму кривої струму.

Під час перевірки можливих варіантів реконструкції або заміни чинних фільтрокомпенсувальних пристроїв необхідно визначити сумарну реактивну потужність, яка може бути скомпенсована на кожному вводі. Для цього спочатку

розраховується номінальна або фактична компенсувальна потужність кожного окремого ФКП. У розрахунку слід враховувати кількість ступенів компенсації, потужність конденсаторних батарей, параметри реакторів, фактичний рівень напруги та технічний стан обладнання.

Після визначення потужності окремих пристроїв виконується їх групування відповідно до схеми підключення. Фільтрокомпенсувальні установки, приєднані до одного вводу 10 кВ, розглядаються як єдина група. Сумарна компенсувальна потужність на відповідному вводі визначається як сума потужностей усіх ФКП, електрично пов’язаних із цим вводом.

Під час такого підсумовування необхідно враховувати, що не всі пристрої можуть працювати одночасно на повну потужність. Частина ступенів може вмикатися автоматично залежно від рівня реактивного навантаження. Тому поряд із установленою потужністю доцільно визначати фактичну середню та максимальну потужність компенсації. Це дозволить точніше оцінити реальний вплив ФКП на коефіцієнт потужності та струмове навантаження вводу.

Крім того, важливо перевірити відповідність компенсувальної потужності фактичному реактивному навантаженню. Недостатня компенсація не забезпечує необхідного підвищення коефіцієнта потужності, а надмірна може призвести до перекомпенсації, підвищення напруги та появи небажаних резонансних явищ. Тому потужність ФКП повинна вибиратися з урахуванням добових і змінних графіків навантаження.

Для кожного вводу 10 кВ доцільно скласти окремий баланс активної, реактивної та повної потужності. У ньому необхідно відобразити реактивну потужність електроприймачів, установлену потужність ФКП, фактичну компенсувальну потужність і залишкову реактивну потужність, що надходить із зовнішньої мережі. Такий баланс дозволяє оцінити ефективність наявної системи компенсації та визначити необхідність її реконструкції.

Під час вибору нового фільтрокомпенсувального обладнання слід враховувати не лише необхідну потужність компенсації, а й спектральний склад струмів у мережі. За наявності значних вищих гармонік звичайні конденсаторні

установки можуть перевантажуватися та передчасно виходити з ладу. У таких випадках необхідно застосовувати установки з дроселями або спеціально налаштовані фільтри, розраховані на поглинання найбільш характерних гармонік.

Реконструкція ФКП може передбачати заміну застарілих конденсаторних батарей, установлення сучасних регуляторів реактивної потужності, поділ компенсації на більшу кількість ступенів, модернізацію комутаційної апаратури та впровадження засобів дистанційного контролю. Це дозволить підвищити точність регулювання, зменшити кількість перемикань і забезпечити більш стабільний режим роботи мережі.

Економічний ефект від модернізації фільтрокомпенсувальних пристроїв формується за рахунок зниження втрат активної електроенергії, зменшення плати за перетікання реактивної енергії, розвантаження трансформаторів і кабельних ліній, а також продовження строку служби обладнання. Додатковий ефект може бути отриманий завдяки покращенню якості напруги та зменшенню аварійності електрообладнання.

У техніко-економічному розрахунку необхідно порівняти річну економію з капітальними витратами на придбання та монтаж нового ФКП. На цій основі визначається строк окупності запропонованого заходу. Якщо модернізація одночасно забезпечує фільтрацію гармонік, до економічного ефекту доцільно включати також зменшення втрат і витрат на ремонт обладнання, спричинених несинусоїдальністю струмів і напруг.

Отже, техніко-економічні розрахунки підвищення ефективності копрового цеху повинні виконуватися комплексно. Вони мають поєднувати аналіз технічного стану обладнання, оцінку енергетичних режимів, визначення капітальних та експлуатаційних витрат, розрахунок очікуваної економії та оцінювання строку окупності. Такий підхід дозволяє вибрати найбільш доцільний варіант реконструкції.

Визначення сумарної скомпенсованої реактивної потужності на кожному вводі 10 кВ є необхідною умовою правильної оцінки ефективності

фільтрокомпенсувальних пристроїв. Послідовний розрахунок потужності кожного ФКП, їх розподіл за вводами та порівняння з фактичним реактивним навантаженням дають змогу обґрунтувати параметри модернізації та забезпечити надійну й економічну роботу системи електропостачання копрового цеху.

3.2 Визначення економічних показників впровадження компенсації реактивної потужності фільтрокомпенсуючими пристроями

Ввод Т-11 фільтр Ф-3 ТКРМ. Згідно з даними варіанту № 1 передбачається збільшення в два рази існуючої ємності шляхом заміни існуючих батарей на конденсатори типу КЕПФ-7,3-300-2УХЛ1 -14 шт. на кожну фазу.

Так як передбачено підключення ємностей по схемі зірка, приймаємо номінальну напругу конденсаторів $U_{ном}$=6,33 кВ. Згідно паспортних даних ємність конденсаторної батареї типу КЕПФ-7,3-300-2УХЛ1 $С_{конд}$ 17,93 мкФ.

Реактивна електроенергія, скомпенсована однією конденсаторною батареєю, кВар·год:

$$Q_{кб}=U^2_{ном}\cdot 2\cdot 3,14\cdot f\cdot C_{конд} \quad , \quad (3.1)$$

де f - частота мережі 50 Гц.

$$Qкб=6,33^2\cdot 10^6\cdot 2\cdot 3,14\cdot 50\cdot 17,93\cdot 10^{-6}=225,588,$$

Реактивна електроенергія, скомпенсована фільтром Ф-3 ТКРМ на вводі Т-11, кВар·год:

$$Q_{ском.ф}=3\cdot Q_{кб}\cdot n, \quad (3.2)$$

де*n*- кількість конденсаторних батарей в одній фазі 7 шт.

$$Q_{ском.ф}=3\cdot225,588\cdot7=4737,3\text{кВар}\cdot\text{год},$$

Заходи з реконструкції та заміні ФКП на вводах Т-13, Т-15, Т-16, Т-17, Т-18, Т-19, Т-110 не передбачені.

Згідно паспортних даних ємність конденсаторної батареї типу КЕПФ-7,3-300-2УХЛ1 $С_{конд}$ 17,93 мкФ.

3.3 Визначення фінансово-економічних показників варіантів реконструкції та заміни ФКП

Для об’єктивної оцінки фінансово-економічної доцільності різних варіантів реконструкції, модернізації або повної заміни фільтрокомпенсуючих пристроїв необхідно провести комплексний аналіз технічних, енергетичних та економічних показників. Основна увага при цьому має приділятися визначенню величини зниження втрат електричної енергії після впровадження ФКП, а також оцінюванню економічного результату, який може бути отриманий упродовж розрахункового періоду експлуатації обладнання.

Фільтрокомпенсуючі пристрої забезпечують компенсацію реактивної потужності, зменшення рівня вищих гармонік струму та напруги, підвищення коефіцієнта потужності й покращення загальних показників якості електричної енергії. Унаслідок цього знижується струмове навантаження на трансформатори, кабельні та повітряні лінії, комутаційні апарати й обмотки електродвигунів. Зменшення величини струму, що протікає через елементи системи електропостачання, безпосередньо сприяє скороченню активних втрат потужності та електроенергії.

Першим етапом розрахунку є визначення втрат електроенергії в трансформаторах комплектних трансформаторних підстанцій до встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв. Під час такого розрахунку необхідно враховувати паспортні параметри трансформаторів, їх номінальну потужність, втрати холостого ходу, втрати короткого замикання, фактичне завантаження, коефіцієнт потужності навантаження, тривалість роботи та характер добового або річного графіка електроспоживання.

Втрати електроенергії в трансформаторах до установки фільтра складаються з постійної та змінної частин. Постійна складова визначається втратами холостого ходу, які виникають у магнітопроводі трансформатора та практично не залежать від величини навантаження. Ці втрати мають місце протягом усього часу перебування трансформатора під напругою, навіть якщо приєднане електрообладнання не працює або працює з мінімальним навантаженням.

Змінна складова пов’язана з втратами в обмотках трансформатора та залежить від квадрата струму навантаження. За низького коефіцієнта потужності для передавання тієї самої активної потужності через трансформатор протікає більший струм. Це призводить до збільшення втрат у міді обмоток, додаткового нагрівання ізоляції та зниження допустимого рівня завантаження трансформатора. Наявність вищих гармонік додатково погіршує режим роботи, оскільки спричиняє зростання вихрових струмів, поверхневого ефекту та додаткових втрат у конструктивних елементах трансформатора.

При визначенні втрат до встановлення ФКП необхідно використовувати фактичні значення активної та реактивної потужності, коефіцієнта потужності, струму навантаження, коефіцієнта завантаження трансформатора та тривалості роботи в окремих режимах. Особливо важливо враховувати нерівномірність навантаження протягом зміни, доби або року, оскільки використання лише середньорічного значення потужності може призвести до недостатньо точної оцінки втрат.

Доцільно виконувати розрахунок окремо для періодів максимального, середнього та мінімального навантаження. Це дозволяє визначити, у яких режимах компенсація реактивної потужності та фільтрація гармонік забезпечуватимуть найбільший технічний і економічний результат. Для підприємств із різкозмінним навантаженням необхідно також ураховувати тривалість пікових режимів, частоту пусків потужних електродвигунів і роботу нелінійних споживачів.

Після визначення базового рівня втрат необхідно розрахувати очікувані втрати електроенергії після встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв. У цьому випадку враховуються технічні характеристики обраного обладнання, його номінальна компенсуюча потужність, коефіцієнт фільтрації гармонік, ступінь підвищення коефіцієнта потужності та можливість автоматичного регулювання залежно від поточного навантаження.

Зниження реактивної складової струму після впровадження ФКП сприяє зменшенню повного струму трансформатора. Оскільки навантажувальні втрати пропорційні квадрату струму, навіть відносно невелике зниження струмового навантаження може забезпечити помітне скорочення втрат електроенергії. Одночасно зменшується нагрівання обмоток, покращуються температурні умови роботи трансформатора та підвищується ресурс його ізоляції.

Окремо необхідно оцінити зменшення втрат електричної енергії в лініях мережі живлення. До встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв кабельні та повітряні лінії передають не лише активну, а й значну реактивну потужність. Це збільшує повний струм у провідниках, спричиняє додаткові втрати напруги та активної потужності, а також обмежує пропускну здатність мережі.

Розрахунок втрат у лініях до встановлення фільтрів має виконуватися з урахуванням активного опору провідників, їх довжини, перерізу, матеріалу, фактичного струму навантаження та тривалості роботи. За наявності несинусоїдального струму необхідно враховувати його гармонічний склад, оскільки вищі гармоніки збільшують діюче значення струму та сприяють зростанню додаткових теплових втрат у кабельних лініях.

Після встановлення ФКП реактивна потужність частково або повністю компенсується безпосередньо поблизу споживачів. У результаті зменшується потік реактивної енергії від джерела живлення до навантаження, знижується струм у лініях, скорочуються втрати активної потужності та покращується рівень напруги на затискачах електрообладнання. Це особливо важливо для протяжних ліній і мереж із великим струмовим навантаженням.

Наступним напрямом аналізу є визначення втрат електроенергії в обмотках електродвигунів до встановлення фільтрокомпенсуючих пристроїв. За низької якості напруги, наявності гармонік, несиметрії фаз і значного споживання реактивної потужності збільшується струм статора, виникають додаткові втрати в міді та сталі, посилюється нагрівання обмоток і знижується коефіцієнт корисної дії електродвигунів.

Вищі гармоніки створюють додаткові магнітні поля, які можуть обертатися в напрямку, протилежному основному полю. Це спричиняє появу паразитних електромагнітних моментів, вібрацій, шуму та додаткових втрат у роторі й статорі. Унаслідок підвищення температури обмоток прискорюється старіння ізоляції та скорочується строк служби електродвигуна.

Застосування фільтрокомпенсуючих пристроїв дозволяє зменшити рівень гармонічних складових, стабілізувати режим напруги та знизити реактивну складову струму. У результаті зменшуються електричні та магнітні втрати в електродвигунах, покращується їх енергетична ефективність, знижується температура нагрівання й підвищується надійність роботи технологічного обладнання.

Економічний ефект від реконструкції або заміни ФКП визначається на основі сумарного зменшення втрат електроенергії в трансформаторах, лініях мережі та електродвигунах. Обсяг заощадженої електроенергії необхідно помножити на чинний або прогнозований тариф, що дозволяє визначити річну економію витрат на електропостачання.

До складу економічного ефекту також можуть входити зменшення плати за перетікання реактивної електроенергії, зниження витрат на технічне

обслуговування й ремонт обладнання, скорочення кількості аварійних відмов, збільшення строку служби трансформаторів, кабельних ліній і електродвигунів, а також вивільнення додаткової пропускної здатності системи електропостачання.

Під час фінансової оцінки необхідно враховувати вартість придбання фільтрокомпенсуючих пристроїв, витрати на проєктування, доставку, монтаж, налагодження, введення в експлуатацію та подальше технічне обслуговування. Якщо передбачається реконструкція наявного обладнання, окремо визначаються витрати на демонтаж застарілих елементів, заміну конденсаторних батарей, дроселів, систем керування, комутаційної та захисної апаратури.

Для порівняння різних варіантів доцільно визначати строк окупності інвестицій, чистий дисконтований дохід, індекс прибутковості та внутрішню норму рентабельності. Такі показники дозволяють оцінити не лише величину річної економії, а й ефективність вкладення коштів упродовж усього розрахункового періоду експлуатації фільтрокомпенсуючих пристроїв.

Крім того, необхідно враховувати строк корисного використання обладнання, норму амортизації, можливе зростання тарифів на електроенергію, витрати на заміну окремих елементів та прогнозовану зміну навантаження підприємства. Для підвищення достовірності результатів доцільно виконати аналіз кількох сценаріїв: оптимістичного, базового та песимістичного.

Таким чином, комплексне визначення втрат електроенергії в трансформаторах до установки фільтра є вихідною основою для подальшого оцінювання ефективності ФКП. Порівняння фактичних або розрахункових втрат до і після впровадження фільтрокомпенсуючого обладнання дозволяє визначити реальну величину енергетичної економії та обґрунтувати доцільність капітальних вкладень.

Запропонований підхід забезпечує всебічний аналіз варіантів реконструкції або заміни ФКП, оскільки враховує не лише пряме скорочення витрат на електроенергію, а й підвищення надійності системи електропостачання, зменшення теплового навантаження на обладнання,

покращення якості електроенергії та продовження строку експлуатації основних виробничих фондів.

Втрати електроенергії в трансформаторах до установки фільтра:

$$\Delta W_T = n_T\left(\Delta P_x^{`} \cdot 8760 \cdot k_{\text{зг}}^2 \cdot \Delta P_k^{`} \cdot \tau_{\text{м}}\right) \cdot 10^{-3}, \quad (3.3)$$

де $\Delta P_x^{`}, \Delta P_{\text{к}}^{`}$ - наведені втрати ХХ і КЗ, кВт;

$\tau_{\text{м}}$ - число годин максимальних втрат.

$$\tau_{\text{м}} = \left(0{,}124 + \frac{T_{\text{м}}}{10000}\right)^2 \cdot 8760, \quad (3.4)$$

$$\Delta P_x^{`} = \Delta P_{\text{х}} + \gamma \frac{I_{\text{х}} S_{\text{ном}}}{100}, \quad (3.5)$$

$$\Delta P_{\text{к}}^{`} = \Delta P_{\text{к}} + \gamma \frac{U_{\text{х}} S_{\text{ном}}}{100}, \quad (3.6)$$

де γ - еквівалент реактивної потужності, який залежить від додаткових втрат електроенергії при передачі через елементи мережі додаткової потужності, яка обумовлена втратами реактивної потужності в трансформаторах, γ=0,01 кВт/квар:

$$\Delta P_x^{`} = 1{,}9 + 0{,}01\frac{1{,}2 \cdot 1000}{100} = 2{,}02 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_{\text{к}}^{`} = 10{,}8 + 0{,}01\frac{5{,}5 \cdot 1000}{100} = 11{,}35 \text{ кВт},$$

$$\tau_{\text{м}} = \left(0{,}124 + \frac{5400}{10000}\right)^2 \cdot 8760 = 3862\frac{\text{год}}{\text{рік}},$$

$$\Delta W_T = 2(2{,}02 \cdot 8760 + 0{,}84^2 \cdot 11{,}35 \cdot 3862) \cdot 10^{-3} = 97{,}248 \text{ МВт} \cdot \text{год}$$

Експлуатаційні витрати від втрат електроенергії:

$$E_T = C_W \cdot \Delta W_T, \quad (3.7)$$

$$E_T = 1{,}8846 \cdot 97{,}2 = 56{,}85 \text{ тис. грн.},$$

де C_W=1,8846 грн/кВт·год - вартість 1 кВт·год електроенергії.

Втрати електроенергії в трансформаторах після установки фільтра, МВт·г:

$$\Delta W_T^{`} = n_T\left(\Delta P_x^{`} \cdot 8760 + k_{\text{зг}}^2 \cdot \Delta P_{\text{к}}^{`} \cdot \tau_{\text{м}}\right) \cdot 10^{-3}, \quad (3.8)$$

$$\Delta W_T^{`} = 2(2{,}02 \cdot 8760 + 0{,}61^2 \cdot 11{,}35 \cdot 3862) \cdot 10^{-3} = 68{,}01 \text{ МВт} \cdot \text{год},$$

$$\text{E}_{\text{T}}^{`} = C_W \cdot \Delta W_T^{`}, \quad (3.9)$$

$$E_T = 1{,}8846 \cdot 68{,}011 = 39{,}759 \text{ тис. грн.},$$

Економія від зменшення втрат електроенергії в трансформаторах:

$$\boldsymbol{\delta E_T = 56{,}851 - 39{,}759 = 17{,}092} \text{ тис.грн.}. \quad (3.10)$$

Втрати електроенергії в мережі живлення і розподільної мережі при протіканні струмів вищих гармонік визначається за формулою:

$$\Delta W_{\text{л}} = 3 \cdot \sum I_n^2 \cdot R_{\text{э}} \cdot \tau_{\text{м}} \cdot 10^{-6}, \quad (3.11)$$

де I_n - струм n-й гармоніки;

$R_{\text{э}}$=0,65 Ом - еквівалентний опір живильної і розподільної мережі.

До установки фільтра: $I_{n=5}$= 95,5 А; $I_{n=7}$=38,1 А; $I_{n=11}$=12,5 А.

$$\Delta W_{л}=3\cdot(95{,}5^2+38{,}1^2+12{,}5^2)\cdot 0{,}65\cdot 3862\cdot 10^{-6}=80{,}79 \text{ МВт·год}$$

Для зручності розрахунку розглядаємо однотипні, а також взаємопов'язані варіанти і зводимо до таблиць 3.1– 3.5.

Таблиця 3.1 - Ввод Т-11 варіант №1-2 (реконструкція існуючих фільтрів ТКРМ).

Показники ефективності проекту	Значення
NPV	4 013 925
PI	5,10
IRR	813%
PP	1,1229
DPP	1,147

Таблиця 3.2 - Ввод Т-11 варіант №3 (заміна існуючих фільтрів на нові).

Показники ефективності проекту	Значення
NPV	251
PI	1,00
IRR	20%
PP	4,911
DPP	9,997

Ввод Т-12 варіанти №1, 2 (встановлення нової конденсаторної установки на основі некомплектного обладнання) та ввод Т-14 варіант №1 (перемикання БК-4 з 1с. II с.ш. ФПС-1 к 4 с. II с.ш. ФПС -2) розглядаємо спільно.

Таблиця 3.3 - Ввод Т-12 варіанти №1, 2 (встановлення нової конденсаторної установки)

Показники ефективності проекту	Значення
NPV	1 615 669
PI	4,57
IRR	404%
PP	1,247
DPP	1,297

Таблиця 3.4 - Ввод Т-12 варіант №3

Показники ефективності проекту	Значення
NPV	881 789
PI	2,78
IRR	100%
PP	1,989
DPP	2,226

Таблиця 3.5 - Ввод Т-12 варіант №4 (встановлення некомплектної конденсаторної установки)

Показники ефективності проекту	Значення
NPV	1 095 929
PI	4,45
IRR	356%
PP	1,28
DPP	1,337

Таблиця 3.6 - Потоки грошових коштів при впровадженні та налагодженні ФКП

Перша частина таблиці

№	Потоки грошових коштів, тис. грн	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
1	Розрахунковий рік реалізації проєкту	1-й	2-й	3-й	4-й	5-й	6-й	7-й
2	Зменшення змінних витрат	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44
3	Маржинальний прибуток	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44
4	Постійні витрати	–0,56	–0,68	–0,92	–1,16	–1,56	–2,00	–2,60
5	Витрати на поточні та капітальні ремонти	–0,48	–0,60	–0,84	–1,08	–1,44	–1,92	–2,52

6	Амортизація обладнання	–28,80	–21,84	–16,56	–12,60	–9,72	–7,32	–5,52
7	Амортизаційні витрати з урахуванням реалізації проєкту	–28,92	–21,84	–16,56	–12,60	–9,72	–7,80	–5,52
8	Податок на прибуток	–12,96	–12,84	–12,84	–12,84	–12,84	–12,60	–12,48
9	Додатковий дохід від операційної діяльності	10,20	16,92	21,96	25,80	28,56	30,48	31,92
10	Відшкодування амортизаційних відрахувань	28,80	21,84	16,56	12,60	9,72	7,32	5,52
11	Додатковий грошовий потік від операційної діяльності	38,88	38,76	38,64	38,52	38,28	37,92	37,44
12	Капітальні інвестиції	–120,00	0	0	0	0	0	0
13	Податковий кредит із ПДВ за інвестиціями	24,00	0	0	0	0	0	0
14	Чистий потік від інвестиційної діяльності	–96,00	0	0	0	0	0	0
15	Чистий грошовий потік проєкту	–57,12	38,76	38,64	38,52	38,28	37,92	37,44
16	Кумулятивний грошовий потік	–57,12	–18,36	20,28	58,80	97,08	135,00	172,44
17	Коефіцієнт дисконтування	0,91	0,76	0,63	0,53	0,44	0,37	0,31
18	Дисконтований потік від інвестиційної діяльності	–87,36	0	0	0	0	0	0
19	Дисконтований операційний грошовий потік	35,38	29,46	24,34	20,42	16,84	14,03	11,61
20	Чистий дисконтований грошовий потік	–51,98	29,46	24,34	20,42	16,84	14,03	11,61
21	Кумулятивний дисконтований грошовий потік, NPV	–51,98	–22,52	1,82	22,24	39,08	53,11	64,72

Продовження таблиці 3.6

№	Потоки грошових коштів, тис. грн	2019	2020*	2021*	2022*	2023*	2024*	2025*
1	Розрахунковий рік реалізації проєкту	8-й	9-й	10-й	11-й	12-й	13-й	14-й
2	Зменшення змінних витрат	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44
3	Маржинальний прибуток	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44	52,44
4	Постійні витрати	–3,32	–4,16	–5,16	–6,36	–7,80	–9,48	–11,40
5	Витрати на поточні та капітальні ремонти	–3,32	–4,20	–5,28	–6,60	–8,16	–9,96	–12,00
6	Амортизація обладнання	–4,20	–3,84	–2,88	–2,16	–1,68	–1,20	–0,96
7	Амортизаційні витрати з урахуванням реалізації проєкту	–4,20	–3,84	–2,88	–2,16	–1,68	–1,20	–0,96
8	Податок на прибуток	–12,24	–12,00	–11,76	–11,52	–11,28	–11,04	–10,80
9	Додатковий дохід від операційної діяльності	32,64	32,44	32,64	32,40	31,68	30,72	29,28
10	Відшкодування амортизаційних відрахувань	4,20	3,84	2,88	2,16	1,68	1,20	0,96
11	Додатковий грошовий потік від операційної діяльності	36,84	36,28	35,52	34,56	33,36	31,92	30,24
12	Капітальні інвестиції	0	0	0	0	0	0	0
13	Податковий кредит із ПДВ за інвестиціями	0	0	0	0	0	0	0
14	Чистий потік від інвестиційної діяльності	0	0	0	0	0	0	0
15	Чистий грошовий потік проєкту	36,84	36,28	35,52	34,56	33,36	31,92	30,24
16	Кумулятивний грошовий потік	209,28	245,56	281,08	315,64	349,00	380,92	411,16
17	Коефіцієнт дисконтування	0,25	0,21	0,17	0,14	0,12	0,10	0,08
18	Дисконтований потік від інвестиційної діяльності	0	0	0	0	0	0	0
19	Дисконтований операційний грошовий потік	9,21	7,62	6,04	4,84	4,00	3,19	2,42
20	Чистий дисконтований грошовий потік	9,21	7,62	6,04	4,84	4,00	3,19	2,42
21	Кумулятивний дисконтований грошовий потік, NPV	73,93	81,55	87,59	92,43	96,43	99,62	102,04

Підсумкові показники ефективності проєкту за 2012–2025 роки

Показник	Значення
Первісна вартість капітальних інвестицій	120,00 тис. грн
Податковий кредит із ПДВ	24,00 тис. грн
Чисті інвестиційні витрати	96,00 тис. грн
Сумарний операційний грошовий потік за 14 років	507,16 тис. грн
Чистий кумулятивний грошовий потік на кінець 2025 року	411,16 тис. грн
Чистий дисконтований дохід, NPV	102,04 тис. грн
Простий строк окупності	близько 2,48 року
Дисконтований строк окупності	близько 2,93 року
Індекс прибутковості інвестицій, PI	близько 2,17

Розширення розрахункового періоду до 2025 року показує, що впровадження фільтрокомпенсуючого пристрою забезпечує стійкий позитивний фінансовий результат. Незважаючи на поступове збільшення витрат на технічне обслуговування, поточні та капітальні ремонти, проєкт продовжує формувати додатний операційний грошовий потік протягом усього аналізованого періоду.

Чистий кумулятивний грошовий потік на кінець 2025 року становить 411,16 тис. грн. Чистий дисконтований дохід досягає 102,04 тис. грн, що підтверджує економічну доцільність реалізації проєкту. Додатне значення NPV свідчить про те, що дисконтовані надходження від економії електроенергії та зменшення експлуатаційних витрат перевищують початкові інвестиційні витрати.

Індекс прибутковості становить приблизно 2,17, тобто кожна гривня чистих інвестицій забезпечує близько 2,17 грн дисконтованих грошових надходжень. Отже, упровадження та подальша експлуатація ФКП є фінансово ефективним заходом, який сприяє зниженню втрат електричної енергії, зменшенню експлуатаційних витрат та підвищенню загальної енергоефективності підприємства.

Отже, запропоновані технічні рішення, що поєднують компенсацію реактивної потужності та фільтрацію вищих гармонік, сприятимуть значному зменшенню витрат підприємства на придбання реактивної енергії з мережі. Крім

того, в результаті техніко-економічного обґрунтування визначено оптимальний варіант для кожного вводу.

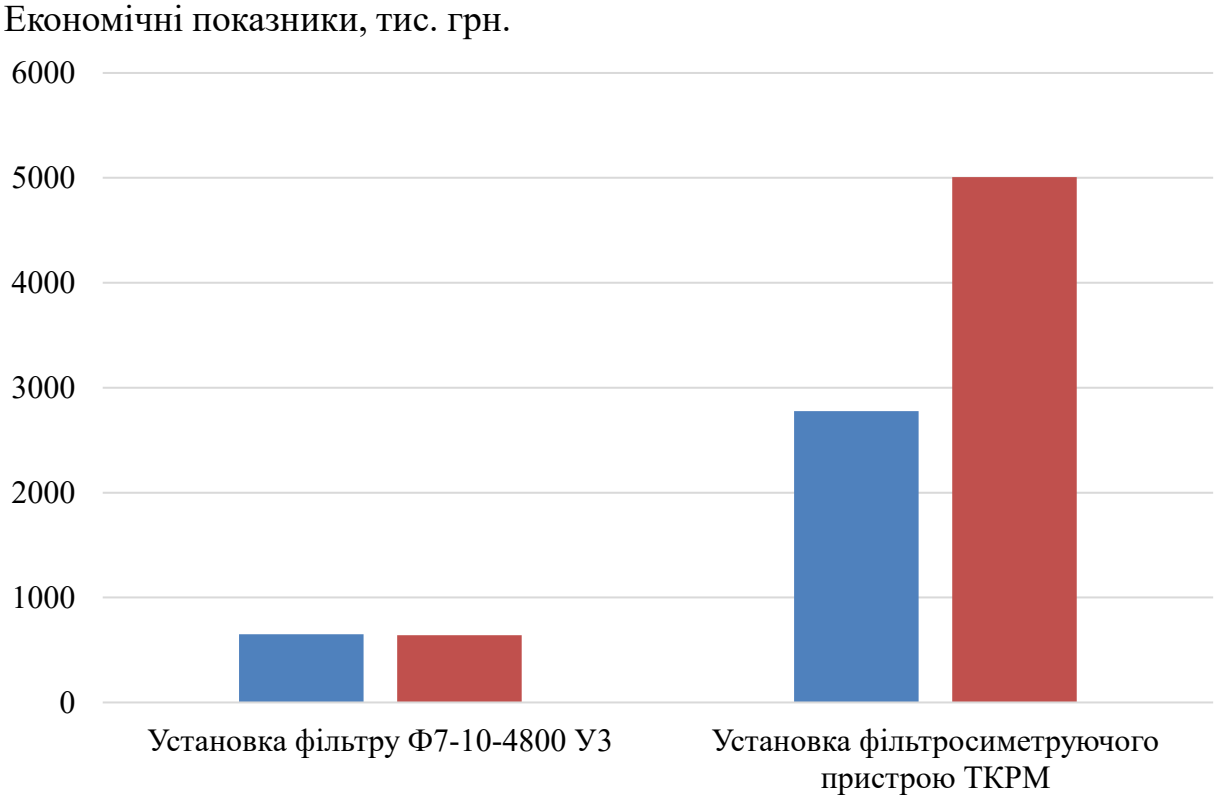


Рисунок 3.1 - Графічне зображення економічної ефективності варіантів реконструкції

Таблиця 3.7 – Загальні показники варіантів реконструкції системи електропостачання

№з/п	Показники	Установка фільтру Ф7-10-4800 У3	Установка фільтросиметруючого пристрою ТКРМ
1	Втрати електроенергії до установки пристрою, тис.грн	1040,08	7578,902

2	Втрати електроенергії після установки пристрою, тис.грн	400,448	2573,037
3	Вартість установки, тис.грн	650,7	2775,9
4	Нормативный коэффициєнт амортизації, %	6,4	8,3
5	Нормативний коефіцієнт на обслуговування, %	3,0	3,0
6	Щорічні витрати на амортизацію і обслуговування, тис.грн	61,758	313,68
7	Економічний ефект від впровадження, тис.грн	639,632	5005,865
8	Термін окупності, років	1,11	0,62

ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто актуальне для сучасного металургійного виробництва завдання підвищення енергоефективності та надійності системи електропостачання копрового цеху ПрАТ «Дніпроспецсталь». Необхідність проведення такого дослідження зумовлена значною енергоємністю технологічного обладнання, використанням потужних асинхронних електроприводів, трансформаторів, перетворювальних установок та інших споживачів, робота яких супроводжується споживанням реактивної потужності, виникненням несиметрії та спотворенням синусоїдальної форми напруги і струму.

У процесі виконання роботи встановлено, що якість електричної енергії є одним із визначальних чинників енергоефективної, надійної та технологічно стійкої роботи металургійного підприємства. Відхилення напруги від номінального значення, її коливання, провали, несиметрія трифазної системи, вищі гармонійні та інтергармонійні складові негативно впливають не лише на окремі електроприймачі, але й на всю внутрішню систему електропостачання. Наслідками погіршення якості електроенергії є збільшення струмового навантаження, додаткові втрати активної потужності, перегрівання електрообладнання, погіршення коефіцієнта потужності, скорочення строку служби ізоляції та зниження надійності технологічного процесу.

Проведений аналіз нормативної бази показав, що оцінювання характеристик напруги в сучасних умовах необхідно здійснювати відповідно до вимог ДСТУ EN 50160:2023. Методи вимірювання, реєстрації та оброблення показників якості електричної енергії мають відповідати положенням ДСТУ EN 61000-4-30:2022. Для внутрішніх промислових мереж додатково доцільно враховувати вимоги електромагнітної сумісності, встановлені стандартами серії IEC 61000.

Застосування сучасної нормативної бази має важливе практичне значення, оскільки раніше встановлене вимірювальне та компенсаційне обладнання переважно проєктувалося з урахуванням вимог застарілих стандартів. Тому автоматичні протоколи відповідності, сформовані приладами попереднього покоління за ГОСТ 13109-97, не можуть розглядатися як остаточне підтвердження відповідності характеристик напруги сучасним вимогам. Первинні результати вимірювань необхідно додатково обробляти та порівнювати з нормативними межами, встановленими чинними стандартами.

У роботі обґрунтовано необхідність систематичного контролю якості електричної енергії на межі балансової належності підприємства, на секціях шин напругою 10 кВ, на шинах трансформаторних підстанцій і безпосередньо біля потужних або особливо чутливих електроприймачів. Такий підхід дозволяє визначити джерело порушення, відокремити вплив зовнішньої електричної мережі від впливу внутрішнього технологічного обладнання та своєчасно виявити небезпечні режими.

Для дослідження параметрів електропостачання розглянуто можливість застосування реєстратора ПАРМА РК 3.01, який забезпечує вимірювання діючих значень напруги, частоти, коефіцієнтів несиметрії, сумарного гармонійного спотворення й окремих гармонійних складових, а також реєстрацію провалів, перенапруг і переривань електропостачання. Водночас установлено, що перед застосуванням цього приладу необхідно перевіряти його технічний стан, чинність метрологічної повірки або калібрування, правильність коефіцієнтів трансформації, часову синхронізацію та відповідність методів вимірювання сучасним нормативним вимогам.

Для отримання достовірної картини режимів електропостачання рекомендовано проводити безперервні вимірювання щонайменше протягом одного повного тижневого циклу. Період спостереження повинен охоплювати робочі та неробочі дні, години максимального і мінімального навантаження, пуски потужних електродвигунів, увімкнення електротермічного й перетворювального обладнання, а також перемикання фільтрокомпенсувальних

пристроїв. Одночасно з електричними параметрами доцільно вести журнал технологічних подій, що дозволить установити зв’язок між змінами режимів роботи обладнання та погіршенням показників якості електроенергії.

Під час аналізу роботи асинхронних двигунів підтверджено, що їхні паспортні характеристики можуть бути забезпечені лише за умови живлення симетричною трифазною напругою, близькою до синусоїдальної форми. За погіршення якості напруги змінюються електромагнітні, енергетичні й теплові процеси в машині. При цьому навіть незначні відхилення, які майже не впливають на частоту обертання ротора, можуть спричиняти суттєве збільшення струмів, втрат і температури обмоток.

Несиметрія напруги призводить до появи струмів зворотної послідовності та магнітного поля, напрямок обертання якого є протилежним обертанню ротора. У результаті виникають додаткові втрати у статорі та роторі, зменшується корисний електромагнітний момент, посилюються пульсації моменту й вібрації, погіршується тепловий режим двигуна. Тривала робота за таких умов прискорює старіння ізоляції та збільшує ймовірність передчасного пошкодження електричної машини.

Наявність вищих гармонійних складових також негативно впливає на роботу електропривода. Вищі гармоніки збільшують діюче значення струму, спричиняють додаткові втрати в обмотках і магнітопроводі, погіршують коефіцієнт потужності, створюють паразитні електромагнітні моменти, вібрації та шум. Одночасний вплив несиметрії та несинусоїдальності є особливо небезпечним, оскільки негативні явища взаємно посилюються.

Дослідження асинхронного двигуна за різних коефіцієнтів завантаження показало, що ступінь впливу показників якості електроенергії залежить від фактичного механічного навантаження. За наближення навантаження до номінального двигун стає більш чутливим до несиметрії, гармонійних спотворень і зниження напруги. Це необхідно враховувати під час визначення допустимих режимів роботи електроприводів та вибору потужності двигунів.

Для комплексного оцінювання впливу несиметрії й несинусоїдальності застосовано планування експерименту за методом Бокса — Вілсона. Отримані залежності дозволяють оцінювати зміну електромагнітного моменту, частоти обертання, коефіцієнта корисної дії та інших характеристик асинхронного двигуна залежно від показників якості напруги й коефіцієнта завантаження. Такі залежності можуть використовуватися для прогнозування технічного стану електропривода, визначення допустимого навантаження і розроблення алгоритмів автоматизованого контролю.

Установлено, що погіршення якості електроенергії впливає не лише на електродвигуни, але й на трансформатори, кабельні лінії, конденсаторні батареї, пристрої релейного захисту, автоматики та обліку. Гармонійні струми збільшують втрати у трансформаторах і провідниках, створюють додаткове теплове навантаження та можуть спричиняти резонансні явища за наявності конденсаторних установок. У зв’язку з цим компенсацію реактивної потужності не можна здійснювати без попереднього аналізу гармонійного складу струмів і частотних характеристик мережі.

Проведений аналіз системи електропостачання показав, що наявні фільтрокомпенсувальні пристрої були встановлені на підприємстві в період, коли склад навантаження, конфігурація мережі та характеристики електрообладнання відрізнялися від сучасних. Упродовж експлуатації змінилися режими роботи технологічних агрегатів, потужність і типи нелінійних споживачів, схеми живлення та величини фонових гармонійних спотворень. Тому параметри чинних ФКП потребують повторної перевірки та, за необхідності, переналаштування або реконструкції.

Ефективність пасивного фільтра залежить від його частоти налаштування, фактичної ємності конденсаторів, індуктивності реакторів, опору мережі, потужності короткого замикання та спектра гармонійних струмів. Старіння конденсаторів, зміна параметрів реакторів і збільшення фонового рівня гармонік можуть призвести до зниження ефективності фільтра, перевантаження його елементів або виникнення резонансу. Тому реконструкція ФКП повинна

передбачати не лише заміну окремих пошкоджених компонентів, але й повний перерахунок частотних характеристик.

У роботі обґрунтовано, що вибір технічного рішення необхідно здійснювати з урахуванням характеру навантаження. Для відносно стабільного гармонійного спектра можуть бути використані переналаштовані пасивні фільтри. За змінного та різкозмінного навантаження доцільнішими є активні або гібридні фільтри, статичні генератори реактивної потужності та статичні тиристорні компенсатори. Такі пристрої здатні забезпечувати швидке регулювання реактивної потужності, зменшення гармонійних спотворень, стабілізацію напруги та обмеження флікера.

Реалізація запропонованих технічних заходів дозволить знизити повний струм у трансформаторах і кабельних лініях, зменшити втрати активної потужності, вивільнити частину пропускної здатності мережі та покращити рівень напруги на затискачах електроприймачів. Одночасно очікується зменшення нагрівання електродвигунів, трансформаторів і конденсаторних установок, підвищення строку служби ізоляції та скорочення кількості аварійних і помилкових спрацьовувань захисту.

Техніко-економічне порівняння варіантів реконструкції показало, що найбільш ефективними є рішення, які передбачають використання придатних елементів чинного обладнання, реконструкцію встановлених фільтрів і раціональне перемикання конденсаторних батарей. Такі варіанти потребують менших капітальних витрат порівняно з повною заміною ФКП та забезпечують швидше повернення вкладених коштів.

Для вводу Т-11 найбільш ефективними визначено варіанти реконструкції чинних фільтрів ТКРМ. Для них отримано найбільше значення чистого дисконтованого доходу та найменший строк окупності. Варіант повної заміни чинних фільтрів на нове обладнання характеризується значно більшими інвестиційними витратами, нижчим індексом прибутковості та тривалішим дисконтованим строком окупності. Це підтверджує доцільність першочергового

розгляду реконструкції та модернізації обладнання, яке зберегло задовільний технічний стан.

Для вводу Т-12 позитивні результати отримано для варіантів установлення нової конденсаторної установки на основі наявного некомплектного обладнання. Порівняльні розрахунки показали, що такі рішення дозволяють досягти достатнього рівня компенсації реактивної потужності за відносно невеликих капітальних витрат. Водночас остаточний вибір варіанта має здійснюватися після технічної діагностики конденсаторів, реакторів, комутаційної апаратури та перевірки їх відповідності фактичному гармонійному спектру.

Розширений аналіз потоків грошових коштів до 2025 року підтвердив економічну доцільність упровадження та налагодження фільтрокомпенсувального пристрою. Початкова вартість капітальних інвестицій становить 120,0 тис. грн, а з урахуванням податкового кредиту з ПДВ чисті інвестиційні витрати дорівнюють 96,0 тис. грн. Після завершення початкового інвестиційного етапу проєкт забезпечує стабільне формування додатних операційних грошових потоків.

Простий строк окупності проєкту становить приблизно 2,48 року, а дисконтований — близько 2,93 року. Отже, навіть з урахуванням зміни вартості грошей у часі вкладені кошти повертаються до завершення третього року експлуатації обладнання. На кінець 2025 року чистий кумулятивний грошовий потік досягає 411,16 тис. грн, а чистий дисконтований дохід становить 102,04 тис. грн.

Індекс прибутковості інвестицій становить близько 2,17, що перевищує граничне значення, рівне одиниці. Це означає, що дисконтовані грошові надходження більш ніж удвічі перевищують чисті інвестиційні витрати. Отримані результати свідчать про достатню фінансову стійкість запропонованого заходу та підтверджують можливість його практичної реалізації.

При цьому фактичний економічний ефект може бути більшим за визначений у розрахунках. Окрім безпосередньої економії електричної енергії,

застосування ФКП забезпечує непрямі вигоди, пов’язані зі зниженням аварійності, скороченням витрат на ремонти, збільшенням строку служби електрообладнання, зменшенням технологічних простоїв і підвищенням продуктивності виробництва. Частина цих результатів не була повністю врахована у прогнозованих грошових потоках.

Для підтримання досягнутого ефекту після впровадження або реконструкції компенсаційного обладнання необхідно організувати постійний моніторинг його роботи. Доцільно контролювати струми й напруги окремих фаз, активну та реактивну потужності, коефіцієнт потужності, температуру конденсаторів і реакторів, рівні окремих гармонік та сумарне гармонійне спотворення. Після введення модернізованого обладнання в експлуатацію необхідно провести повторні вимірювання та порівняти їх із вихідними даними.

Перспективним напрямом подальшого вдосконалення системи електропостачання є створення автоматизованої системи моніторингу якості електроенергії. Така система повинна забезпечувати безперервну реєстрацію параметрів, збереження результатів у єдиній базі даних, автоматичне виявлення перевищень, формування попереджувальних повідомлень і зіставлення електричних подій із режимами роботи технологічного обладнання.

Таким чином, поставлену в роботі мету досягнуто. Проведений аналіз підтвердив безпосередній взаємозв’язок між якістю електричної енергії, втратами в системі електропостачання, технічним станом асинхронних двигунів і загальною енергоефективністю копрового цеху. Обґрунтовано необхідність системного контролю показників якості електроенергії, повторної перевірки параметрів чинних фільтрокомпенсувальних пристроїв та їх модернізації відповідно до сучасного складу навантаження.

Запропоновані заходи мають комплексний характер і поєднують технічні, організаційні та економічні рішення. Їх реалізація сприятиме компенсації реактивної потужності, зниженню гармонійних спотворень і несиметрії напруги, скороченню втрат електроенергії, покращенню теплових режимів електрообладнання та підвищенню надійності технологічного процесу.

Позитивні показники інвестиційної ефективності підтверджують, що модернізація системи компенсації є не лише технічно обґрунтованою, але й економічно вигідною для ПрАТ «Дніпроспецсталь».

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Varetsky, Y.; Gajdzica, M. Power Compatibility of Induction Motors in Industrial Grids Containing Synchronous Generators. Energies. 2024, 17(5), 1066. https://doi.org/10.3390/en17051066

2.Gnaciński, P.; Pepliński, M.; Muc, A.; Hallmann, D. Induction Motors Under Voltage Unbalance Combined with Voltage Subharmonics. Energies. 2024, 17(24), 6324. https://doi.org/10.3390/en17246324

3. Skamyin, A.; Shklyarskiy, Y.; Gurevich, I. Influence of Background Voltage Distortion on Operation of Passive Harmonic Compensation Devices. Energies. 2024, 17(6), 1342.https://doi.org/10.3390/en17061342

4. Hyla, M.; Latko, A. Advanced Static Var Generator in the Reactive Power Automatic Compensation System of an Underground Mine with a Thyristor Hoisting Machine. Energies. 2024, 17(15), 3628.https://doi.org/10.3390/en17153628

5. Gaiceanu, M.; Epure, S.; Solea, R.C.; Buhosu, R. Power Quality Improvement with Three-Phase Shunt Active Power Filter Prototype Based on Harmonic Component Separation Method with Low-Pass Filter. Energies. 2025, 18(3), 556.https://doi.org/10.3390/en18030556

6. Konuhova, M. Modeling of Induction Motor Response to Voltage Sags with Re-Acceleration Analysis. Energies. 2025, 18(21), 5682. https://doi.org/10.3390/en18215682

7. Ivascanu, P.; Panoiu, M.; Panoiu, C. Measurement-Based Analysis of Static Var Compensator Effects in Industrial Rolling Mill Grids. Energies. 2025, 18(23), 6123.https://doi.org/10.3390/en18236123

8Методичні вказівки до дипломного проектування з розділу “Охорона праці”[Текст] : - Запоріжжя.: ЗДІА, 2012. – 60с.

9.Технічна експлуатація електричних станцій і мереж[Текст] : Правила./ ДП ”НТУКЦ” АсЕлЕнерго, - Київ, 2003. – 25 с.

10Депутат, О.П. Цивільна оборона [Текст]/О.П. Депутат, В.І Коваленко, І.С. Мужик. – Львів.: Афіша, 2001.ISBN 966-06-0196-6.

11Проектування. Порядок розробки, погодження та затвердження проектної документації для будівництва[Текст]: ДБН А.2.2-3-2004.–Введ. – 2004-07-01. – Київ: Держстандарт України, 2004. – 39 с.

12Основні вимоги до проектної та робочої документації [Текст]: ГОСТ 21.101.97.–Введ. – 1998-04-01. – М.: Изд-во. стандартов, 2003. –25с.

13Правила пристрою електроустановок[Текст]: Глави 1.7, 2.4, 1.9, 2.5// ПУЕ-2006. – Введ. – 2006-05-01. – К.: ІМЦ, 2006. – 653с.

14Вказівки щодо проектування електропостачання промислових підприємств[Текст]: СН 174-75. – Введ. – 1994-01-01. – К.: Важпромелектропроект, 1994. – 34 с.

15Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів [Текст]: ДНАОП 0.00-1.21-98. – Введ. – 1998-02-10. – К.: Мін. праці і соц.. політики України, 1998. – 134 с.