

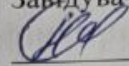
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

До захисту допущено:

Завідувач кафедри



Микола ОСТРОВЕРХОВ

« 17 » 06 2024 р.

Дипломна робота

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Електротехнічні пристрої та
електротехнологічні комплекси»

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

на тему: «Діагностика та контроль показників якості електроенергії у
мережах низької та середньої напруги»

Виконала:

студентка IV курсу, групи ЕВ-01

Очеретна Анастасія Олександрівна

A. Ochernetna

Керівник:

Доцент, кандидат технічних наук

Перетятко Юлія Вікторівна



Рецензент:

В. о. зав. кафедри електричних мереж та систем,

доцент, к.т.н., доцент,

Кацадзе Теймураз Луарсабович



Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає
запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студентка A. Ochernetna

Київ – 2024 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Факультет електроенерготехніки та автоматики

Кафедра теоретичної електротехніки

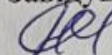
Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Освітньо-професійна програма «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

 Микола ОСТРОВЕРХОВ

« 16 » 06 2024 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломну роботу студенту

Очеретної Анастасії Олександрівни

1. Тема роботи «Діагностика та контроль показників якості електроенергії у мережах низької та середньої напруги», керівник роботи Перетятко Юлія Вікторівна, доцент, кандидат технічних наук, затверджені наказом по університету від «28» травня 2024 р. № 2127-с

2. Термін подання студентом роботи 09.06.2024 р.

3. Вихідні дані до роботи: мережа 0,4 кВ; графіки зміни електричних параметрів в системі електропостачання промислового споживача.

4. Зміст роботи

1) Загальні відомості про показники якості електроенергії в електроенергетичних системах: загальні відомості аналізу кіл несинусоїдного струму; показники якості електроенергії; джерела реактивної потужності та несинусоїдності; характеристики гармонійного спотворення; вимоги стандартів.

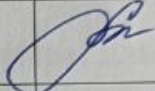
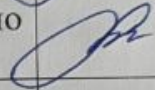
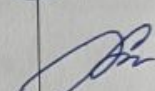
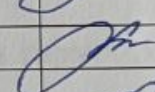
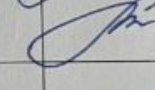
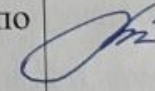
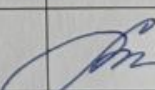
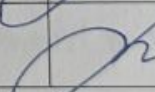
2) Забезпечення якості електроенергії: вплив гармонічних спотворень; технології та методи моніторингу, компенсації та фільтрації.

3) Забезпечення нормативного рівня показників якості електроенергії в системі електропостачання промислового споживача.

5. Перелік ілюстративного матеріалу (із зазначенням плакатів, презентацій тощо):
презентація за темою бакалаврської дипломної роботи.

7. Дата видачі завдання 20.05.2024 р.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1.	Уточнення завдання дипломної роботи	з 20.05.2024	
2.	Написання бакалаврської дипломної роботи	з 24.05 по 10.06.2024	
3.	Представлення оформленої дипломної роботи керівнику для перевірки	09.06.2024	
4.	Перевірка на плагіат	13.06.2024	
5.	Отримання зовнішньої рецензії та допуску до захисту	14.06.2024	
6.	Усунення недоліків, внесення змін та правок, остаточне оформлення роботи	з 14.06 по 16.06.2024	
7.	Попередній внутрішній захист дипломної роботи на кафедрі	17.06.2024	
8.	Захист бакалаврської дипломної роботи	18.06.2024	

Студент

А. Очеретна

Очеретна Анастасія Олександрівна

Керівник



Перетятко Юлія Вікторівна

РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 71 аркуші та містить 23 рисунки, 13 таблиць та 11 літературних посилань.

Актуальність теми – Актуальність теми полягає в критичній необхідності забезпечення стабільної та ефективної роботи електротехнічного обладнання. Реактивна потужність і гармонічні спотворення суттєво впливають на його функціонування, спричиняючи зношення та енергетичні втрати, що підвищує витрати на технічне обслуговування та знижує ефективність енергоспоживання. Вивчення основних споживачів реактивної потужності, причин виникнення гармонічних спотворень та наслідків їх впливу є необхідним для розробки ефективних методів їх усунення. Дослідження обладнання для моніторингу, компенсації та фільтрації цих спотворень дозволяє вибрати оптимальні технології для підтримки стабільності та ефективності електропостачання.

Об'єкт дослідження – Вплив реактивної потужності та гармонік на роботу електротехнічного обладнання.

Предмет дослідження – Основні споживачі реактивної потужності, причини виникнення гармонічних спотворень, обладнання для моніторингу, компенсації та фільтрації.

Мета дослідження – Оцінити вплив реактивної потужності та гармонік на електротехнічне обладнання, визначити основних споживачів реактивної потужності та наслідки їх впливу, вивчити причини виникнення гармонічних спотворень та їх наслідки, дослідити обладнання для моніторингу, компенсації та фільтрації, а також проаналізувати показники якості електроенергії на прикладі промислового підприємства до та після встановлення оптимального обладнання для компенсації реактивної потужності та гармонічних спотворень.

Основні результати – Реалізовано комплексне дослідження з метою

підвищення якості електроенергії в мережах низької та середньої напруги. Розроблено методи та засоби діагностики та контролю параметрів якості електроенергії, включаючи несинусоїдність струму та напруги, гармоніки, активну та реактивну потужності, хвилі струму та напруги, RMS напруги та струму.

Виконано аналіз впливу параметрів якості електроенергії на роботу електрообладнання, підтверджено їх негативний ефект на знос та енергетичні втрати.

Проаналізовано важливість застосування стандартів якості, зокрема, ДСТУ EN 50160:2023, для забезпечення стабільності напруги та надійності електрообладнання.

Отримані результати експериментів підтвердили ефективність використання пристроїв динамічної компенсації з захисними реакторами, що призвело до зниження рівня гармонійних спотворень в 3 рази, зменшення провалів напруги на 4%, а також до підвищення стійкості роботи обладнання та зниження витрат енергоресурсів.

Отримані знання та результати можуть бути використані у практиці енергетичної промисловості для підвищення ефективності та стабільності роботи електричних систем. Подальші напрямки досліджень включають розробку нових технологій та методів управління електричними системами, а також впровадження інноваційних рішень у сфері енергетики.

Ключові слова: РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, ГАРМОНІКИ, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, КОМПЕНСАЦІЯ, АНАЛІЗ, СПОЖИВАЧІ ПОТУЖНОСТІ, ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНЕ ОБЛАДНАННЯ, ДІАГНОСТИКА, КОНТРОЛЬ, ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ.

ABSTRACT

The thesis is made on 68 pages and contains 23 figures, 13 tables and 12 references.

Relevance of the topic - The relevance of the topic is the critical need to ensure stable and efficient operation of electrical equipment. Reactive power and harmonic distortion significantly affect its operation, causing wear and tear and energy losses, which increases maintenance costs and reduces energy efficiency. The study of the main consumers of reactive power, the causes of harmonic distortion and the consequences of their impact is necessary to develop effective methods for their elimination. The study of equipment for monitoring, compensation and filtering of these distortions allows to choose the best technologies to maintain the stability and efficiency of power supply.

Object of research - The impact of reactive power and harmonics on the operation of electrical equipment.

Subject of the study - The main consumers of reactive power, causes of harmonic distortion, equipment for monitoring, compensation and filtering.

Purpose of the study - To assess the impact of reactive power and harmonics on electrical equipment, to identify the main consumers of reactive power and the consequences of their impact, to study the causes of harmonic distortion and its consequences, to study the equipment for monitoring, compensation and filtration, as well as to analyse the quality of electricity on the example of an industrial enterprise before and after the installation of optimal equipment for compensation of reactive power and harmonic distortion.

Main results - A comprehensive study was carried out to improve the quality of electricity in low and medium voltage networks. Methods and tools for diagnosing and monitoring power quality parameters, including non-sinusoidal current and voltage, harmonics, active and reactive power, current and voltage waves, RMS voltage and current, were developed.

The influence of power quality parameters on the operation of electrical equipment is analysed, and their negative effect on wear and energy losses is confirmed.

The importance of applying quality standards, in particular, DSTU EN 50160:2023, to ensure voltage stability and reliability of electrical equipment is analysed.

The experimental results confirmed the effectiveness of using dynamic compensation devices with protective reactors, which led to a 3-fold reduction in harmonic distortion, a 4% reduction in voltage sags, as well as an increase in equipment stability and a reduction in energy consumption.

The knowledge and results obtained can be used in the practice of the energy industry to improve the efficiency and stability of electrical systems. Further areas of research include the development of new technologies and methods for managing electrical systems, as well as the implementation of innovative solutions in the energy sector.

Keywords: REACTIVE POWER, HARMONICS, POWER QUALITY, COMPENSATION, ANALYSIS, POWER CONSUMERS, ELECTRICAL EQUIPMENT, DIAGNOSTICS, CONTROL, HARMONIC DISTORTION.

ЗМІСТ

ЗМІСТ	8
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	9
ВСТУП.....	10
1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ	12
1.1 Загальні відомості аналізу кіл несинусоїдного струму.....	12
1.2 Показники якості електроенергії.....	16
1.3 Джерела реактивної потужності та несинусоїдності	17
1.4 Характеристика гармонійного спотворення	23
1.5 Вимоги стандартів.....	27
Висновки до розділу 1	39
2 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ.....	40
2.1 Вплив гармонічних спотворень.....	40
2.2 Технології та методи моніторингу, компенсації та фільтрації.....	43
2.3 Обладнання призначене для компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонічних спотворень	50
Висновки до розділу 2	57
3 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМАТИВНОГО РІВНЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО СПОЖИВАЧА	58
Висновки до розділу 3	68
ВИСНОВОК	69
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ЯЕ	- якість електроенергії
THDu	- Total Harmonic Distortion - коефіцієнт несинусоїдності напруги
THDi	- Total Harmonic Distortion - коефіцієнт несинусоїдності струму
ЕРС	- електрорушійна сила
РF	- Power Factor - коефіцієнт потужності
РQ	- Power Quality - якість електроенергії
ПЧ	- перетворювачі частоти
ЕС	- електронно комутовані
DPF	- Displacement Power Factor - коефіцієнтом потужності зміщення
DispF	- Displacement Factor - коефіцієнт зміщення
DistF	- Distortion Factor - коефіцієнт спотворення
TPF	- True Power Factor - коефіцієнт істинної потужності
THD	- Total Harmonic Distortion – загальний коефіцієнт гармонік

ВСТУП

Ефективне функціонування електроенергетичних систем значною мірою залежить від якості електроенергії, що постачається споживачам. У сучасних умовах постійного зростання споживання електроенергії, впровадження нових технологій та підвищення вимог до енергоефективності, проблема діагностики та контролю показників якості електроенергії у мережах низької та середньої напруги набуває особливої актуальності.

Якість електроенергії, зокрема параметри реактивної потужності та гармоніки, значною мірою впливають на роботу електрообладнання, його надійність і довговічність. Відхилення від нормативних показників можуть призводити до значних економічних втрат, спричинених виходом з ладу обладнання, зниженням його ефективності та підвищенням енерговитрат. Сучасні електронні пристрої, які стають все більш розповсюдженими як у промисловості, так і в побуті, особливо чутливі до коливань реактивної потужності та гармонік.

Аналіз літературних джерел та досвід роботи провідних підприємств вказують на існування значних проблем у системах діагностики та контролю якості електроенергії. Сучасні методи моніторингу часто не забезпечують достатньої точності та швидкості виявлення відхилень. Традиційні системи контролю, базовані на використанні аналогових приладів та ручних методів аналізу, не відповідають вимогам сучасності, потребуючи значних витрат часу та людських ресурсів.

З огляду на вищезазначене, необхідно розробити нові підходи до діагностики та контролю показників якості електроенергії, що базуються на сучасних технологіях, таких як цифрові системи вимірювання, автоматизовані системи збору та аналізу даних, використання штучного інтелекту для прогнозування та виявлення аномалій. Основними напрямками досліджень у даній роботі є розробка і впровадження системи моніторингу якості електроенергії на основі цифрових приладів і сенсорів, використання методів обробки великих даних для аналізу параметрів якості електроенергії, а також застосування алгоритмів машинного

навчання для прогнозування відхилень та виявлення аномальних ситуацій.

Результати даного проекту можуть бути застосовані в різних галузях енергетики, включаючи промислові підприємства, де якість електроенергії безпосередньо впливає на виробничі процеси, енергопостачальні компанії, які зможуть підвищити надійність та якість послуг, що надаються, а також сфери комунального господарства та побутового сектору, де забезпечення стабільної якості електроенергії є важливим фактором для комфортного життя населення.

Таким чином, дана дипломна робота спрямована на вирішення актуальної проблеми підвищення якості електроенергії в мережах низької та середньої напруги, що має важливе значення для різних сфер економіки та суспільного життя.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПОКАЗНИКИ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

1.1 Загальні відомості аналізу кіл несинусоїдного струму

Важливість електричної енергії полягає у її універсальному застосуванні в усіх аспектах життя сучасного суспільства. Вона є життєво важливою для забезпечення функціонування побутових, комерційних та промислових систем, зокрема для освітлення, опалення, охолодження, роботи комп'ютерів, виробництва, транспорту та інших галузей. Боротьба за якість електроенергії виникає з необхідності забезпечення стабільності, ефективності та безпеки у використанні електроенергії. Низька якість електроенергії може призвести до різних проблем, таких як збої в роботі електронних приладів, перегрів обладнання, втрати продуктивності та навіть загрози для життя та здоров'я.

Причини несинусоїдальності можуть бути різноманітними. По-перше, наявність нелінійних навантажень у системі є однією з головних причин. Нелінійні навантаження включають у себе електронні пристрої, які не споживають струм (current) пропорційно до напруги (voltage), що надходить до них. Це можуть бути комп'ютери, інвертори, LED-лампи та інші пристрої. Ці пристрої генерують гармоніки, що призводить до спотворення форми напруги або струму в електричній мережі.

Крім того, несинусоїдальність може виникати також через вплив силових електронних пристроїв, таких як фотоелектричні інвертори, які конвертують постійний струм (direct current), що генерується фотоелектричними панелями, у змінний струм для використання у мережі. Якщо ці інвертори не працюють ідеально, вони можуть виробляти гармоніки, які спотворюють форму струму, що вводиться в мережу [1].

У реальному світі, електротехнічні пристрої мають криві ЕРС і струмів, які відрізняються від синусоїдних. Наприклад, у великих генераторах електростанцій, форми кривих ЕРС, що індукуються в обмотках, не є чистими синусоїдами.

Коли серед споживачів електроенергії є пристрої з нелінійними характеристиками (такі як комп'ютери, офісна техніка та сучасна побутова техніка), то навіть при синусоїдних ЕРС можуть виникати несинусоїдні струми і напруги.

На рис. 1, як приклад, показано коло з нелінійним резистором. Його нелінійна вольт-амперна характеристика призводить до появи струму несинусоїдної форми при подачі на вхід кола синусоїдної напруги [2].

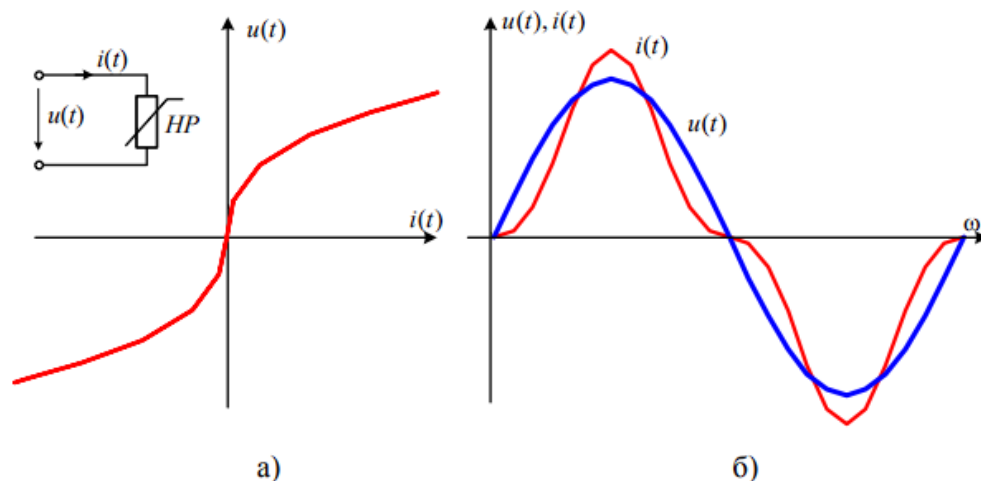


Рисунок 1.1 - Нелінійна вольт-амперна характеристика [2]

Спотворення синусоїдних струмів і напруг в системі електропостачання є неприйнятним. Виникнення вищих гармонічних складових у вигляді напруги спричинює додаткові втрати енергії в електродвигунах і трансформаторах, впливає на іонізаційні процеси в ізоляції електродвигунів, трансформаторів та кабельних ліній, що призводить до прискореного старіння, ускладнює компенсацію реактивної потужності за допомогою конденсаторних батарей і погіршує робочі умови пристроїв автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Окрім генераторів синусоїдних (або умовно-синусоїдних) ЕРС, в радіотехнічних пристроях, обчислювальній техніці, автоматизованих системах керування тощо використовуються генератори періодичних сигналів, форма яких може значно відрізнятися від синусоїди, наприклад, прямокутна (рис. 1.2, а) або “пилкоподібна” (рис. 1.2, б). Використання такого генератора призводить до того, що в окремих елементах кола форми струмів та напруг можуть значно відрізнятися від форми збуджуючого сигналу [2].

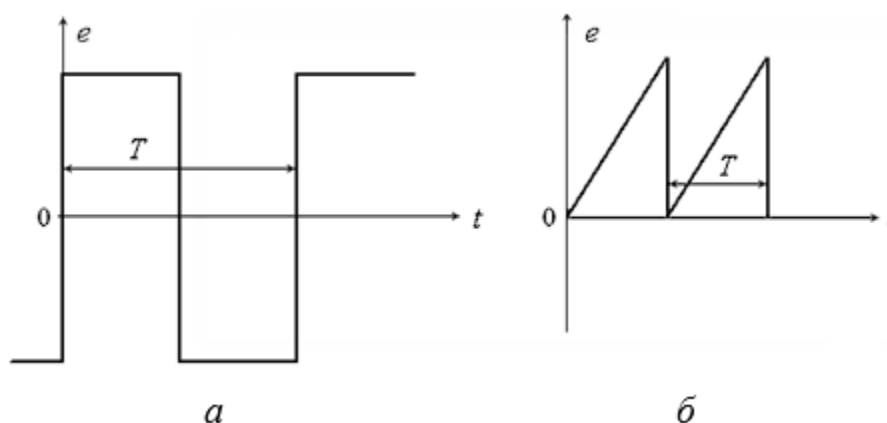


Рисунок 1.2 – Форми періодичних сигналів [2]

Криві, що відображені на рис. 1.1, б та 1.2, є періодичними з періодом T і слугують прикладами несинусоїдних періодичних струмів та ЕРС.

Виникнення несинусоїдних періодичних ЕРС, струмів та напруг може бути спричинено наступними факторами:

1. джерело ЕРС (струму) генерує несинусоїдну періодичну ЕРС (несинусоїдний періодичний струм);
2. джерело ЕРС (струму) виробляє синусоїдну періодичну ЕРС (синусоїдний періодичний струм), але один із елементів цепи є нелінійним;
3. джерело ЕРС (струму) подає постійну або синусоїдну ЕРС (струм), але один або декілька елементів цепи періодично змінюють свої характеристики в часі.

Несинусоїдальна форма напруги або струму може мати серйозні наслідки. Вона може призводити до перегріву електричного обладнання, збільшення втрат енергії, погіршення роботи електронних пристроїв та навіть до пошкодження обладнання або втрати даних. Більше того, гармоніки (harmonic) можуть впливати на роботу інших електричних пристроїв, підключених до мережі, і можуть створювати додаткові проблеми з якістю електроенергії.

Коефіцієнт потужності (power factor) є мірою ефективності використання електричної енергії та вказує на те, наскільки ефективно використовується енергія у мережі. Низький коефіцієнт потужності вказує на те, що частина потужності, що надходить до споживача, витрачається на реактивне навантаження (наприклад, на створення магнітного поля у трансформаторах або електричних моторах), а не на корисну активну потужність. У наслідок цього знижується ефективність роботи електричних систем і збільшуються витрати електроенергії.

Коефіцієнт несинусоїдності (THD) вимірює ступінь спотворення синусоїдальної форми напруги чи струму в електричній системі. Високий рівень гармонік може вказувати на наявність нелінійних навантажень, таких як світлодіоди, комп'ютери, інвертори та інші, які впливають на якість електричної енергії. Гармоніки можуть призводити до змін в роботі електронних пристроїв, підвищення втрат енергії, перегріву обладнання та збільшення витрат електроенергії [3].

Одним із авторів, що зазначає вплив інверторів на несинусоїдність, є Бекиров [4]. Він вказує, що високий рівень гармонік струмів, що виділяються сонячними фотоелектричними інверторами, в мережах низької напруги, є однією з причин спотворення синусоїдальних кривих напруг.

Таким чином, наявність низьковольтної мережі з гармоніками та навантаженнями, які вона несе, може призвести до зниження ефективності використання електроенергії (низький коефіцієнт потужності) та погіршення якості

електроенергії (високий коефіцієнт несинусоїдності). Ці фактори є важливими для забезпечення стабільності та ефективності електричної мережі та забезпечення задоволення потреб споживачів.

1.2 Показники якості електроенергії

В енергосистемах різного роду несправності, динамічна робота енергетичного обладнання, збільшення нелінійних навантажень часто призводять до погіршення якості електроенергії (ЯЕ) (power quality (PQ)). Термін «якість електроенергії» насправді є комбінацією якості напруги та якості струму, але оскільки енергосистема може контролювати лише якість напруги, це в основному стосується якості напруги живлення. Оскільки якість струму залежить від питомого навантаження, що споживає струм енергосистеми. Тому для підтримки напруги живлення в прийнятних межах застосовуються стандарти в області якості електроенергії. Системи живлення змінного струму призначені для роботи з синусоїдальними напругами постійної частоти. Порушення якості електроенергії виникають, коли відхилення напруги живлення, частоти живлення або форми сигналу значно змінюються внаслідок різного роду несправностей, нелінійних навантажень, комутації великих навантажень, роботи силового електронного обладнання, тощо.

Порушення якості електроенергії завдає величезних економічних збитків енергопостачальним компаніям, їх споживачам (особливо промисловим) і постачальникам електрообладнання. Більшість споживачів електроенергії не знайомі з типами порушень якості електроенергії, які зазвичай зустрічаються в енергосистемах. Проблеми з якістю електроенергії можуть негативно вплинути на навантаження, що піддаються впливу, наприклад, збої, нестабільність і короткий термін служби. Тому виявлення та класифікація порушень якості електроенергії має велике значення для покращення якості електроенергії та уникнення аварій в енергосистемах [5].

Проблеми із якістю електроенергії часто проявляються як вплив на напругу в системі та частоту мережі. Їх можна широко класифікувати на основі змін амплітуди напруги, частоти та перехідних процесів. Тому вимоги до якості електроенергії, що надається споживачам, є необхідними і визначають параметри, які повинні бути відповідними для забезпечення належної роботи електрообладнання. ДСТУ EN 50160:2023 — стандарт, що визначає характеристики напруг живлення в загальних електромережах.

Стандарт EN 50160 визначає основні характеристики напруги на клеммах споживачів у мережах електропостачання низької, середньої, високої та надвисокої напруги. Він встановлює обмеження або значення для очікуваних характеристик напруги в будь-якій точці підключення до загальноєвропейської мережі.

1.3 Джерела реактивної потужності та несинусоїдності

Нелінійні споживачі використовують активну потужність при основній частоті і одночасно створюють потужність на вищих гармоніках, яка потрапляє в мережу.

Ці споживачі можуть викривлювати форму синусоїди напруги в мережі, що призводить до генерації вищих гармонік. Вищі гармоніки можуть негативно впливати на якість електроенергії та якість електроенергії та надійність енергозабезпечення.

Приклади нелінійних навантажень:

- перетворювачі частоти (ПЧ);
- приводи постійного струму;
- електронно коמוтовані (ЕС) двигуни;
- зарядні пристрої для акумуляторів і електромобілів;
- блоки живлення та інша електроніка;
- світлодіодне та люмінісцентне освітлення;

Для більшості електричних навантажень, таких як двигуни, струм відстає/випереджає від напруги на кут φ .

Коефіцієнт потужності (PF) , який визначається як $\cos\varphi$ показує, яка частка загальної потужності (S), що споживається навантаженням, використовується для виконання корисної роботи (P).

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}. \quad (1.1)$$

Ця формула застосовується для синусоїдальної напруги і струму. Ось чому коефіцієнт потужності називають "коефіцієнтом потужності зміщення" (DPF (Displacement Power Factor)).

Коефіцієнт потужності, близький до одиниці, означає, що видима(повна) потужність S мінімальна. Це означає, що номінальна потужність електричного обладнання мінімальна для передачі заданої активної потужності P до навантаження. Реактивна потужність тоді мала в порівнянні з активною потужністю. Низьке значення коефіцієнта потужності вказує на протилежну ситуацію.

Складові коефіцієнту потужності:

- Displ.PF- зміщення кривої струму відносно напруги (ємнісна або індуктивна);
- Dist.PF- деформація кривої струму (та напруги) відносно струму (напруги) 1 гармоніки.

Нижче наведено на рис.1.3 зображено графіки спотворень, що впливають на коефіцієнт потужності: коефіцієнт зміщення (DispF) і коефіцієнт спотворення (DistF) [6].

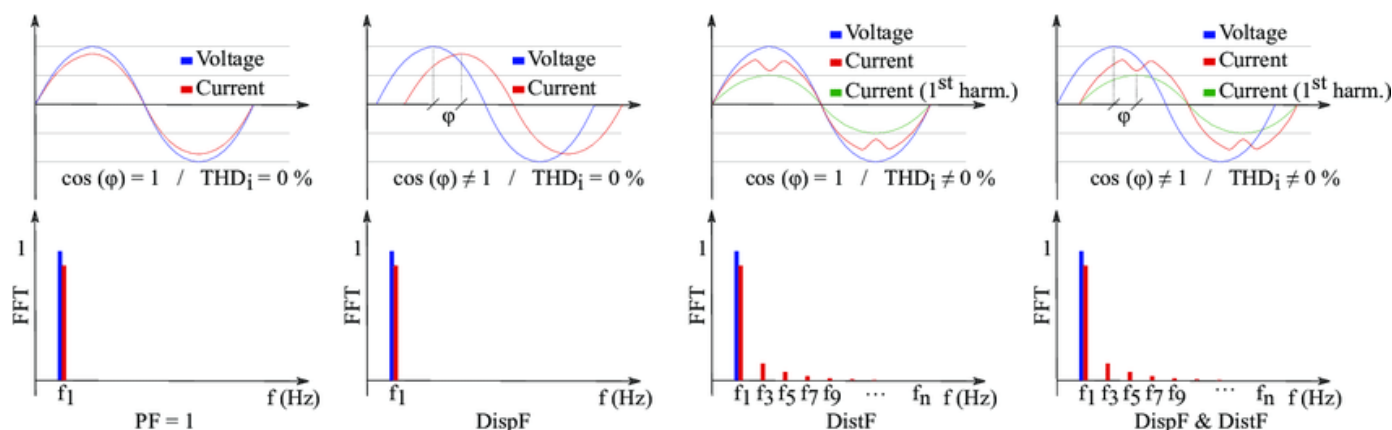


Рисунок 1.3 – Графіки спотворень, що впливають на коефіцієнт потужності:
коефіцієнт зміщення (DispF) і коефіцієнт спотворення (DistF) [7]

Коефіцієнт істинної потужності (TRF) - це комбінація коефіцієнта потужності і коефіцієнта спотворення. Це міра загальної ефективності схеми в перетворенні видимої потужності в реальну, враховуючи як фазовий зсув, так і гармонійні спотворення:

$$PF = \frac{P}{F} \Rightarrow PF = \text{DistF} \cdot \text{DispF} = \frac{1}{\sqrt{1 + \text{THD}_i^2}} \cdot \cos\varphi, \quad (1.2)$$

де φ - кут зсуву фаз між сигналами напруги та струму;

THD - коефіцієнт нелінійних спотворень.

TRF враховує і потужність гармонічних спотворень (Distortion Power), та переводить вираз у 3D (рис.1.4).

При введенні гармонійних спотворень 2D-трикутник потужності розширюється до 3D-простору, де потужність спотворень (D) додається як третя вісь. Коефіцієнт істинної потужності (TRF) стає косинусом кута між віссю реальної потужності (Real Power) і діагональною лінією, що з'єднує осі реальної потужності, реактивної потужності (Reactive Power) і потужності спотворень (Distortion Power).

Таке 3D-представлення дає більш повне розуміння коефіцієнта потужності (Apparent Power), враховуючи вплив гармонійних спотворень, які можуть суттєво впливати на ефективність перетворення електроенергії [7].

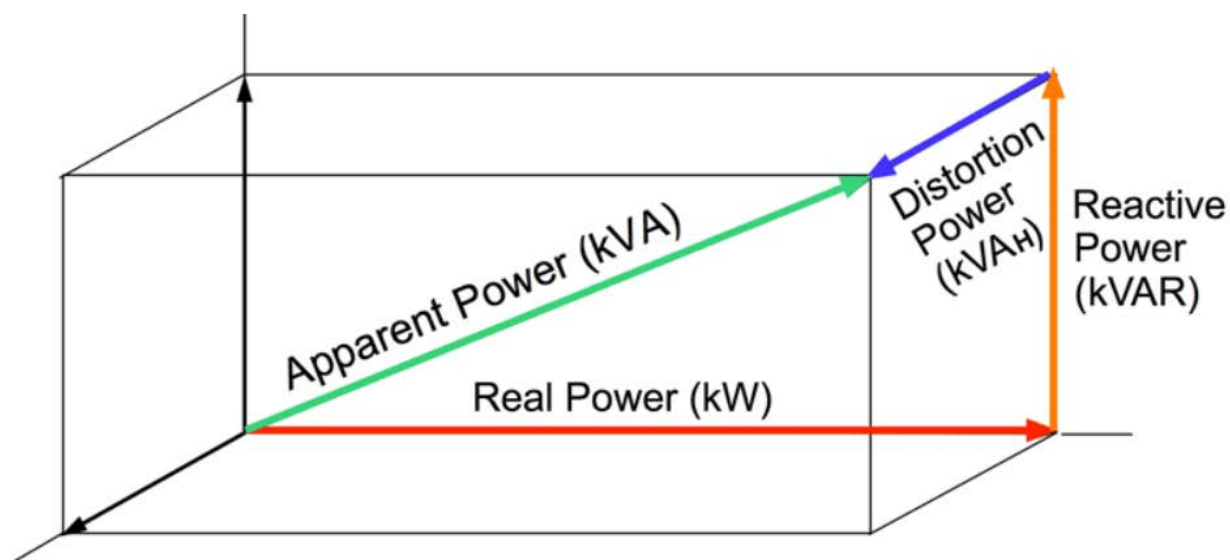


Рисунок 1.4 – Представлення істинного коефіцієнта потужності (TPF) в 3D трикутнику потужності [7]

Потужність гармонічних спотворень додає додатковий струм гармонічних спотворень, який збільшує струм в лінії:

$$Sequ = \sqrt{P^2 + Q^2 + D(H)^2}. \quad (1.3)$$

Види реактивного навантаження поділяються – на ємнісні та індуктивні.

Індуктивне навантаження (Inductive load)

Усі індуктивні (тобто електромагнітні) пристрої, які працюють від мережі змінного струму перетворюють електричну енергію від генераторів енергосистеми на механічну роботу та тепло. Ця енергія називається «активною» енергією.

Для того, щоб здійснити це перетворення в машинах повинні бути створені магнітні поля. Магнітне поле створюється циркуляцією струму в котушках, які є переважно індуктивними. Тому струм у цих котушках відстає на 90° відносно

напруги, і являє собою реактивний струм, що поглинається машиною. Реактивний струм не забирає енергію з системи, він спричиняє втрати потужності в системах передачі та розподілу нагріваючи провідники. Реактивно – індуктивні навантаження та реактивний опір лінії значно впливають на падіння напруги.

Індуктивно – реактивна потужність є умовно позитивною (поглинається індуктивним навантаженням), а ємнісна реактивна потужність є від'ємною (виділяється ємнісним навантаженням).

Прикладами індуктивних навантажень є електродвигуни, інвертори (при роботі в режимі споживання реактивної потужності) [6].

Ємнісне навантаження (Capacitive load)

Струм, що протікає через конденсатори, випереджає напругу на 90° . Відповідний вектор струму протилежний вектору струму індуктивних навантажень. Ось чому конденсатори широко використовуються в електричних системах, щоб компенсувати реактивну потужність, що поглинається індуктивними навантаженнями, такими як двигуни. Реактивно – ємнісні струми спричиняють підвищення напруги в енергосистемах.

Прикладами ємнісних навантажень є конденсатори, комп'ютери, LED, Laptop, плазми, імпульсні блоки живлення.

Все обладнання та прилади змінного струму, які включають електромагнітні пристрої або залежать від магнітозв'язаних обмоток, потребують певного рівня реактивного струму для створення магнітного потоку.

Найпоширенішими елементами цього класу є трансформатори, реактори, двигуни та газорозрядні лампи. Частка реактивної потужності (квар) по відношенню до активної потужності (кВт), при повному навантаженні залежить від типу обладнання. Нижче в табл. 1.1 та табл. 1.2 наведені практичні значення $\cos\phi$ для найпоширенішого обладнання промислових та побутових споживачів [6].

Таблиця 1.1 - Практичні значення $\cos\phi$ для найпоширенішого обладнання промислових споживачів [6]

Обладнання промислових споживачів	$\cos\phi$
Асинхронний двигун	0,85
Лампи розжарювання	1
Люмінісцентні лампи	0,5
Розрядні лампи	0,4-0,6
Печі з елементами опору	1
Індукційні печі	0,85
Діелектричні печі	0,85
Апарат для контактного зварювання	0,8-0,9
Стаціонарний 1-фазний зварювальний апарат	0,5
Поворотні центри дугового зварювання	0,7-0,9
Трансформатори/вимпрямлячі для дугового зварювання	0,7-0,9
Дугові печі	0,8

Таблиця 1.2 - Практичні значення $\cos\phi$ для найпоширенішого обладнання побутових споживачів [6]

Обладнання побутових споживачів	$\cos\phi$
LED/LCD/TV	-0,56
Зарядний пристрій для ноутбука	-0,57
Мобільний зарядний пристрій	-0,48
Мікрохвильова піч	0,97
Холодильник	0,53
Пральна машина	0,99
Вентилятор	0,87
Диспенсер для води	0,99
Електрочайник	0,97
Електрообігрівач	0,99
Кондиціонер	0,95
Компактна люмінісцентна лампа (КЛЛ)	0,67

Обладнання, яке оснащено імпульсними блоками живлення є ємнісним навантаженням, та генерує реактивну потужність в мережу. Має DPF з позначкою lead, та негативне значення цього параметру. Індуктивні споживачі мають DPF з позначкою lag, та позитивне значення. Ці фактори повинні враховуватися при розрахунку балансу споживання реактивної потужності.

1.4 Характеристика гармонійного спотворення

Наявність гармонік в електричних системах означає, що струм і напруга спотворюються і відхиляються від синусоїдальної форми. Гармонійні струми спричинені нелінійними навантаженнями, підключеними до розподільчої системи. Навантаження вважається нелінійним, якщо струм, який воно споживає, не має такої ж форми, як напруга живлення. Протікання гармонійних струмів через опори системи, в свою чергу, створює гармоніки напруги, які спотворюють напругу живлення.

Гармоніка порядку h (зазвичай її називають просто h -ю гармонікою) в сигналі - це синусоїдальна складова з частотою, яка в h разів перевищує основну частоту.

Рівняння гармонічного розкладання періодичної функції $y(t)$ наведено нижче:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{h=1}^{h=\infty} Y_h \sqrt{2} \sin(h\omega t - \varphi_h), \quad (1.4)$$

де Y_0 - значення постійної складової, зазвичай дорівнює нулю і надалі вважається таким;

Y_h - середньоквадратичне значення гармоніки порядку h ;

ω - кутова частота основної частоти;

φ_h - зсув гармонічної складової при $t = 0$ [8].

На рис. 2.3 показано приклад хвилі струму, на яку впливають гармонічні спотворення в електричній розподільчій системі 50 Гц. Спотворений сигнал є сумою ряду накладених гармонік. На рис. 1.5 показано ідеальну форму сигналу 50 Гц з піковим значенням I_{peak} , яке можна прийняти за одиницю. Аналогічно, на ньому також зображені криві з амплітудами $(1/9)$, $(1/7)$, $(1/5)$ та $(1/3)$ за одиницю і частотами, що в дев'ять, сім, п'ять і три рази перевищують основну частоту, відповідно. Така поведінка, що демонструє гармонійні складові зі спадаючою

амплітудою, часто за оберненим законом з гармонійним порядком, є типовою для енергосистем. Ці форми сигналу можуть бути виражені як:

$$i_1 = I_{m1} \sin \omega t; \quad (1.5)$$

$$i_3 = I_{m3} \sin(3\omega t - \delta_3), \quad (1.6)$$

де I_{m_h} - пікове середньоквадратичне значення гармоніки струму h .

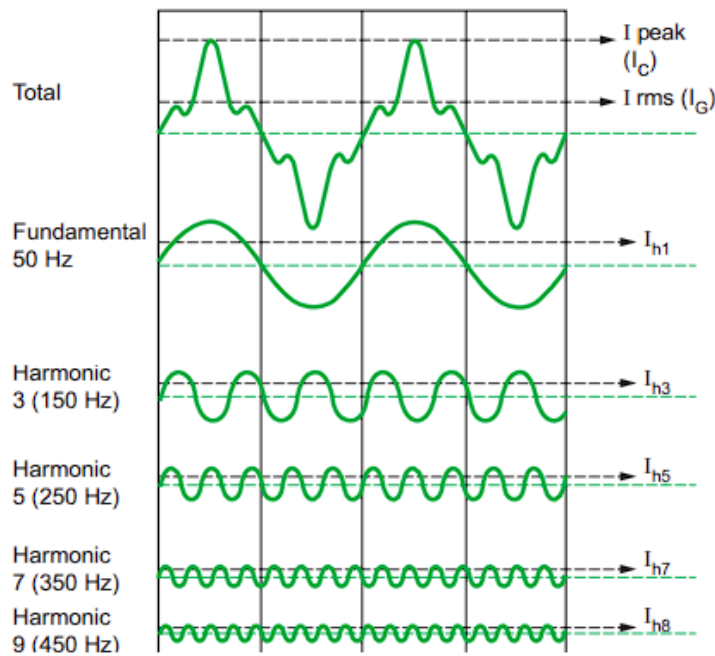


Рисунок 1.5 - Приклад струму, що містить гармоніки, та розкладання загального струму на гармоніки 1 (основна), 3, 5, 7 та 9 порядків [6]

На рис. 1.5 показано форми гармонік накладені на струм основної частоти, що дає I_{total} . Якщо взяти лише перші три гармоніки, то на рисунку показано, як виглядатиме спотворена форма струму на виводах імпульсного перетворювача. Всі інші гармоніки ще більше спотворюють форму сигналу. Таким чином, результуючу спотворену форму сигналу можна виразити як:

$$I_{total} = I_{h1} + I_{h3} + I_{h5} + I_{h7} + I_{h9}. \quad (1.7)$$

Можна зробити висновок, ідеально синусоїдальні форми сигналу можуть призвести до спотворену форму сигналу. І навпаки, спотворений сигнал може бути представлений як суперпозиція сигналу основної частоти з іншими сигналами з різними частотами та амплітудами гармонік [8].

Загальний коефіцієнт гармонік (THD) - це показник спотворення сигналу. Для сигналу y , THD визначається як:

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{Y_2^2 + Y_3^2 + \dots + Y_n^2}}{Y_1}, \quad (1.8)$$

де THD - це відношення середньоквадратичного значення всіх гармонійних складових сигналу y до основного сигналу Y_1 ;

Н зазвичай приймається рівним 50, але в більшості випадків може бути обмежене до 25.

Показники спотворення струму та напруги:

$$\text{THDi} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1}; \quad (1.9)$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_n^2}}{V_1}. \quad (1.10)$$

Лінійні навантаження (Linear loads)

Лінійні навантаження - це навантаження, в яких сигнали напруги та струму дуже близько слідують один за одним, наприклад, падіння напруги, що розвивається на постійному опорі, який змінюється як пряма функція струму, що проходить через нього. Ця залежність більш відома як закон Ома і стверджує, що струм через опір, який живиться від джерела змінної напруги, дорівнює відношенню між напругою і опором, що описується формулою:

$$i(t) = \frac{u(t)}{R}. \quad (1.11)$$

Форми кривих напруги та струму в електричних колах з лінійними навантаженнями виглядають однаково. У разі чистої напруги розімкнутого кола, форма струму буде ідентична без спотворень. Це спрощує розрахунок форм кривих напруги і струму. Виділення тепла резистивними лінійними навантаженнями пропорційне квадрату струму, а споживану потужність можна визначити як добуток напруги і струму. Інші лінійні навантаження, такі як електродвигуни, можуть включати втрати в магнітопроводі, залежні від фізичних характеристик заліза та міді. Спотворення можуть виникати при роботі обладнання з феромагнітним осердям в області насичення. Конденсаторні батареї для корекції коефіцієнта потужності також є лінійними навантаженнями [6].

Нелінійні навантаження (Nonlinear loads)

Нелінійні навантаження – це навантаження, в яких форма струму не відповідає формі напруги через використання електронних перемикачів, що проводять струм лише частину періоду. Закон Ома не може описати їх зв'язок між напругою і струмом. Найпоширеніші приклади: випрямляючі пристрої в перетворювачах потужності, джерелах живлення, ДБЖ, електричних печах та люмінесцентних лампах.

Нелінійні навантаження спричиняють низку збурень, таких як спотворення форми кривої напруги, перегрів трансформаторів та інших силових пристроїв, перевантаження по струму на нульовому проводі обладнання, телефонні перешкоди та проблеми з мікропроцесорним управлінням.

Навіть лінійні навантаження, такі як силові трансформатори, можуть стати нелінійними в умовах насичення, коли магнітний потік (B) перестає значно збільшуватися, хоча інтенсивність магнітного потоку (H) зростає. Це відбувається на коліні насичення кривої намагнічування трансформатора і проявляється як крива

гістерезису. Нелінійний ефект триватиме до зникнення насичення, що може статися при підвищеній напрузі або перевантаженні трансформатора.

Обладнання, що містить схеми силової електроніки, є типовим нелінійним навантаженням і генерує гармонійні струми. Такі навантаження все частіше зустрічаються у всіх промислових, комерційних і побутових установках, а їх відсоток у загальному споживанні електроенергії постійно зростає.

Приклади включають:

- промислове обладнання (зварювальні апарати, дугові та індукційні печі, зарядні пристрої);
- приводи зі змінною швидкістю для двигунів змінного або постійного струму;
- джерела безперебійного живлення;
- офісне обладнання (ПК, принтери, сервери тощо);
- побутова техніка (телевізори, мікрохвильові печі, флуоресцентні лампи, диммери).

Одночасне використання ємнісних та індуктивних пристроїв у розподільчих мережах може призвести до паралельного або послідовного резонансу.

Причиною резонансу є дуже високі або дуже низькі значення імпедансу на рівні шин на різних частотах. Зміни імпедансу змінюють струм і напругу в розподільчій мережі [5].

1.5 Вимоги стандартів

Якість електричної енергії при роботі з низькою напругою

Стандартна номінальна напруга U_n для мереж низької напруги загальної призначеності має значення $U_n = 230$ В між фазним і нульовим проводом або між фазним проводами:

- для трифазних чотирипровідних мереж: $U_n = 230$ В між фазним та нульовим проводом;
- для трифазних трипровідних мереж: $U_n = 230$ В між фазними проводами.

Відхилення напруги (Voltage Deviation, δU_v , %)

У нормальних робочих умовах, за винятком періодів, під час котрих відбувались переривання напруги, змінення напруги не повинні перевищувати ± 10 % від величини номінальної напруги U_n .

В умовах, коли електричну енергію постачають електромережі без зв'язку з об'єднаною енергосистемою чи до особливо віддалених користувачів мережею, змінення напруги не повинні перевищувати $+10\%$ / -15% від U_n . Користувачів мережею електропостачання має бути поінформовано про ці умови [9].

Розмах зміни напруги (Voltage change range, δU_t , %)

Якщо розглядати якість електроенергії в точці приєднання під час періодичних коливань напруги у формі меандра, то вона вважається відповідною стандартам, якщо виміряний розмах змін напруги не перевищує значень, визначених на відповідних кривих на рис. 1.6 для відповідної частоти повторення змін напруги $F_{\delta U_t}$ або інтервалу між змінами напруги $\Delta t_{i,i+1}$.

Граничне допустиме значення суми сталого відхилення напруги δU_y та розмаху змін напруги δU_t в точках приєднання до електричних мереж напругою 0,38 кВ рівно ± 10 % від номінальної напруги [9].

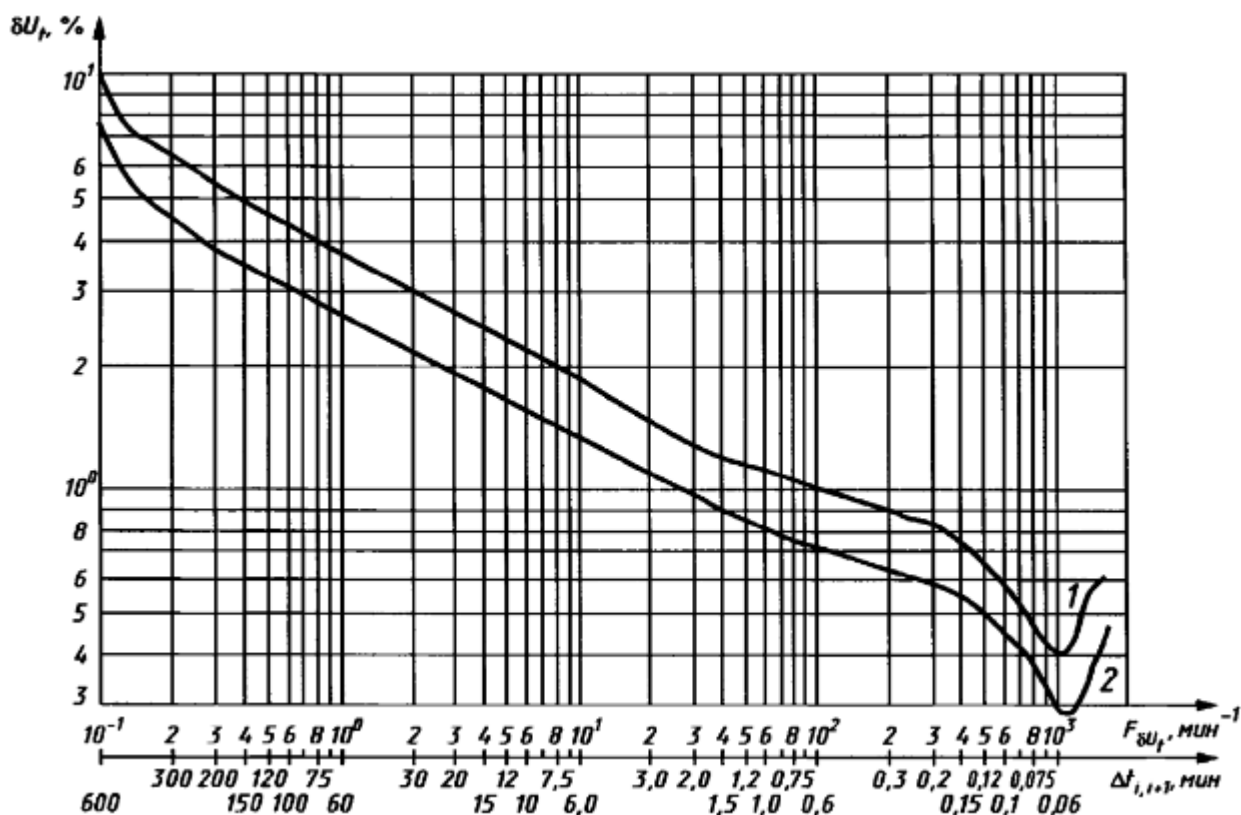


Рисунок 1.6 – Розмахи зміни напруги, що допускаються, в залежності від частоти повторення змін напруги за 10 хвилин для коливань напруги, що мають форму меандру [9]

Доза флікера (Flicker severity, P_t)

Показник довготривалого флікера (мерехтіння), спричиненого коливанням напруги, для мереж низької напруги має бути меншим або рівним 1 для 95 % часу спостереження.

Якість електроенергії з точки зору дози флікера P_{St} відповідає стандартам, якщо короткочасна та тривала дози флікера, визначені протягом 24 годин або розраховані, не перевищують встановлених гранично допустимих значень. Для короткочасної дози флікера це значення дорівнює 1,38, а для тривалої P_{Lt} - 1,0 при коливаннях напруги з формою, відмінною від меандра.

У точках приєднання споживачів електроенергії, які користуються лампами розжарювання в приміщеннях з високою зоровою потребою, гранично допустимі

значення для короткочасної дози флікера становлять 1,0, а для тривалої - 0,74 при коливаннях напруги з формою, відмінною від меандра [9].

Небаланс напруг електропостачання (Voltage unbalance)

95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-хвилинному проміжку, для мереж низької напруги мають бути в межах від 0 % до 2 % від складника напруги прямої послідовності [9].

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги (Harmonic Distortion, K_U)

Нормально допустимі і гранично допустимі значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги в пунктах контролю, які є точками загального приєднання до електричних мереж з різними номінальними напругами $U_{ном}$, наведені в табл. 1.3 [10].

Таблиця 1.3 - Значення коефіцієнта спотворення синусоїдальності кривої напруги [10]

Нормальне допустиме значення при $U_{ном}$, кВ				Гранично допустиме значення при $U_{ном}$, кВ			
0,38	6-20	35	110-330	0,38	6-20	35	110-330
8	5	4	2	12	8	6	3

Коефіцієнт n-ої гармонічної складової напруги (The n-th harmonic component, $K_{U(n)}$)

Вважається, що якість електричної енергії за показником коефіцієнта гармонічної складової напруги відповідає вимогам, якщо:

- найбільше значення, зафіксоване протягом 24 годин, не перевищує 4,5%;
- 95% значень не перевищують 4% [10].

Напруга сигналів у мережах електропостачання (Mains communication voltages)

Сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги електропостачання, ураховуючи всі гармоніки до 40-ї включно, для мереж низької напруги має бути меншим чи рівним 8 %.

У деяких країнах електропостачальник може використати електромережі загальної призначеності для передавання сигналів. Протягом 99 % доби значення напруг сигналів, усереднені на трисекундному проміжку, мають бути меншими чи рівними значенням, наведеним на рис. 1.7 [9].

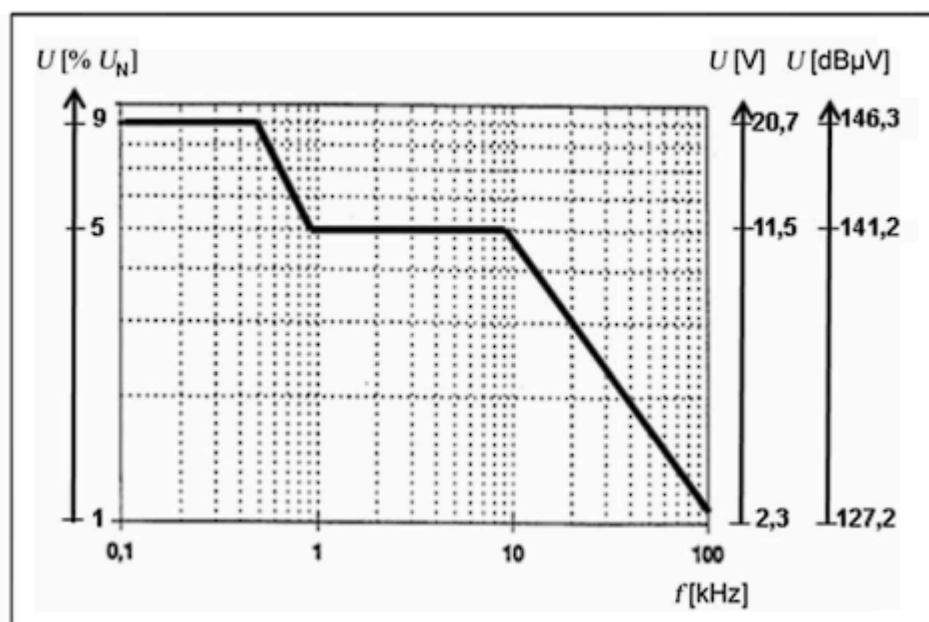


Рисунок 1.7 — Рівні напруги у відсотках від U_N залежно від частоти сигналів, що їх застосовують у мережах низької напруги загальної призначеності [9]

Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності (Voltage unbalance factor in the reverse sequence, K_{2U})

Допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж не повинно перевищувати 2,0%. У той же час, існують гранично допустимі значення, які становлять 4,0% [10].

Коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності (Voltage unbalance factor in zero sequence, K_{0U})

Нормально допустиме та гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги за нульовою послідовністю в точках загального приєднання до чотирипровідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ дорівнюють 2,0 та 4,0 % відповідно [10].

Відхилення частоти (Frequency Deviation, f)

Номінальна частота напруги електропостачання має бути 50 Гц. За нормальних робочих умов середнє значення частоти основного складника напруги, яку виміряно на проміжку 10 с, має бути в межах:

- для систем, які синхронно підключено до об'єднаної енергосистеми:
 - 50 Гц $\pm$ 1 % (протягом 99,5 % часу за рік)
 - 50 Гц + 4 % /- 6% (протягом 100 % часу вимірювання);
- для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми:
 - 50 Гц $\pm$ 2% (протягом 99,5 % часу за рік)
 - 50 Гц $\pm$ 15 % (протягом 100 % часу вимірювання) [9].

Тривалість провалу напруги (Voltage swell duration, Δt_n)

Тимчасове зниження напруги в електромережі до рівня нижче 90% від номінального, з наступним відновленням до початкового або близького до нього значення протягом 10 мс - декількох десятків секунд [9].

Імпульсна напруга (High Voltage Spikes, $U_{\text{імп}}$)

Тривалість наростання імпульсної напруги вище 110% від номінального значення тривалістю 10-50 мкс (з часом фронту імпульсу 1-10 мкс). Грозові розряди генерують імпульсні напруги з високою амплітудою, але меншою енергією, порівняно з імпульсними напругами, що виникають внаслідок комутаційних процесів, які, як правило, мають більшу тривалість [10].

Коефіцієнт тимчасової перенапруги (Temporary overvoltage factor, $K_{\text{перУ}}$)

Короткочасне перевищення напруги вище 110% від номінального значення тривалістю 1000-5000 мкс.

Значення тимчасового коефіцієнта перенапруги загальної точки приєднання до мережі залежить від тривалості перенапруги і не перевищує значення, зазначеного в табл. 1.4 [9].

Таблиця 1.4 - Значення тимчасового коефіцієнта перенапруги [9]

Тривалість тимчасової перенапруги $t_{\text{пер}U}$, с	До 1
Коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$, в.о	1,47

Якість електричної енергії при роботі з середньою напругою

Користувачі, які потребують більшої потужності, ніж може забезпечити низьковольтна мережа, переважно підключаються до мереж з напругою більше 1 кВ. Середня напруга стосується систем електропостачання з напругою до 36 кВ [9].

Відхилення напруги (δU_v , %)

У нормальних робочих умовах, за винятком періодів, під час котрих відбувались переривання напруги, змінення напруги не повинні перевищувати ± 10 % від величини декларованої напруги U_c .

В умовах, коли електричну енергію постачають електромережі без зв'язку з об'єднаною енергосистемою чи до особливо віддалених користувачів мережею, змінення напруги не повинні перевищувати $+ 10$ % /- 15 % від U_c . Користувачів мережею електропостачання має бути поінформовано про ці умови [9].

Розмах зміни напруг (δU_t , %)

Розмах зміни напруги - це величина коливань активного значення напруги протягом інтервалу часу менше однієї хвилини (δU_t , %).

Діапазон зміни напруги - це різниця між амплітудою або фактичними значеннями напруги перед та після одноразової зміни напруги, і визначається за допомогою відповідної формули:

$$\delta U_t = \left(\frac{U_i - U_{i+1}}{\sqrt{2}U_H} \right) \cdot 100\%, \quad (1.13)$$

де U_i і U_{i+1} - значення екстремумів можуть виникати послідовно, або ж може мати місце поява одного екстремуму, за яким слідує горизонтальний рівень амплітуди обхідної напруги.

Діапазони коливань, що можуть бути прийнятними, представлені на рис. 1.8.

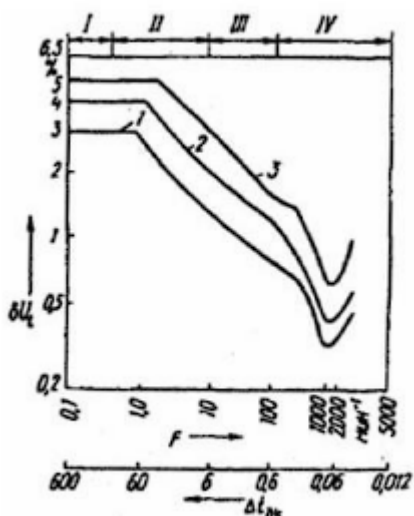


Рисунок 1.8 – Допустимі розмахи коливань напруги [9]

Доза флікера (P_f)

За нормальних робочих умов у будь-якому тижневому періоді показник довгочасного флікера P_{fT} , спричиненого коливанням напруги, має бути менше або рівний 1 для 95 % часу спостереження.

У випадку появи скарг потрібно або вибрати інші значення норм для середньої та високої напруг, або вжити таких заходів стосовно зниження відповідних показників, щоб значення P_{fT} для низької напруги не перевищувало 1 [9].

Небаланс напруг електропостачання

За нормальних робочих умов протягом кожного тижневого періоду 95 % середньоквадратичних значень складника зворотної послідовності напруги електропостачання, усереднених на 10-ти хвилинному проміжку, мають бути в межах від 0 % до 2 % від складника напруги прямої послідовності [9].

Коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги (K_U)

Нормально та гранично допустимі значення K_U будуть рівними 5% і 8% [10].

Коефіцієнт n-ої гармонічної складової напруги ($K_{U(n)}$)

Табл. 1.5 містить гранично допустимі значення коефіцієнта n-ой гармонійної складової напруги. Якість електроенергії за даним показником вважається відповідною вимогам, якщо:

- найбільше значення, зафіксоване протягом 24 годин, не перевищує гранично допустимого (згідно з табл. 1.5).
- значення n-ой гармонійної складової з 95% ймовірністю не перевищує нормально допустимого (табл. 1.5).

Таблиця 1.5 - Величина n-ой гармонійної складової напруги [10]

Номер гармонійної складової	Нормально допустиме значення, %	Гранично допустиме значення, %	Номер гармонійної складової	Нормально допустиме значення, %	Гранично допустиме значення, %
2	1,5	2,25	22	0,2	0,3
3	1,5	2,25	23	1	1,5
4	0,7	1,05	24	0,2	0,3
5	4	6	25	1	1,5
6	0,3	0,45	26	0,2	0,3
7	3	4,5	27	0,2	0,3
8	0,3	0,45	28	0,2	0,3
9	0,5	0,75	29	0,89	1,33
10	0,3	0,45	30	0,2	0,3
11	2	3	31	0,85	1,27
12	0,2	0,3	32	0,2	0,3
13	2	3	33	0,2	0,3
14	0,2	0,3	34	0,2	0,3
15	0,3	0,45	35	0,77	1,16
16	0,2	0,3	36	0,2	0,3
17	1,5	2,25	37	0,74	1,11
18	0,2	0,3	38	0,2	0,3
19	1	1,5	39	0,2	0,3
20	0,2	0,3	40	0,2	0,3
21	0,2	0,3			

Напруга сигналів у мережах електропостачання

У деяких країнах електропостачальник може використовувати загальні електричні мережі для передавання сигналів. Протягом 99% доби значення напруги

сигналів, усереднені за трисекундний період, повинні бути рівними або меншими за значення, вказане на рис. 1.9 [9].

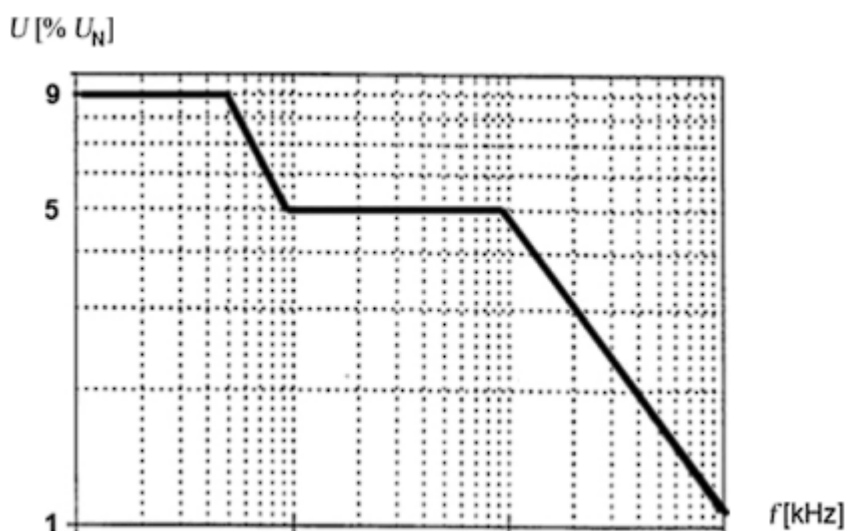


Рисунок 1.9 — Рівні напруги у відсотках від U_N залежно від частоти сигналів, що їх застосовують у мережах низької напруги загальної призначеності [9]

Коефіцієнт несиметрії напруг по зворотній послідовності (K_{2U})

Нормально допустиме та гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруги по зворотній послідовності в точках загального приєднання до електричних мереж рівні 2 та 4 % відповідно [10].

Коефіцієнт несиметрії напруг по нульовій послідовності (K_{0U})

Значення коефіцієнтів несиметрії напруг по нульовій послідовності у точці передачі електроенергії, усереднені за 10-хвилинний інтервал, не повинні перевищувати 2% протягом 95% часу за тиждень і 4% протягом 100% часу за тиждень [10].

Відхилення частоти (f)

Номінальна частота напруги електропостачання має бути 50 Гц. За нормальних робочих умов середнє значення частоти основного складника напруги, яку виміряно на проміжку 10 с, має бути в межах:

- для систем, які синхронно підключено до об'єднаної енергосистеми:

- 50 Гц $\pm$ 1 % (протягом 99,5 % часу за рік)
- 50 Гц + 4 % /- 6% (протягом 100 % часу вимірювання);
- для мереж без синхронного підключення до об'єднаної енергосистеми:
 - 50Гц $\pm$ 2% (протягом 99,5 % часу за рік)
 - 50 Гц $\pm$ 15 %(протягом 100 % часу вимірювання) [9].

Тривалість провалу напруги (Δt_n)

Щоб зібрати статистичні дані, треба виявляти та вимірювати провали напруги/перенапруги, відповідно до EN 61000-4-30, застосовуючи номінальне значення напруги мережі як опорне. Характеристики провалів напруги/перенапруги, розглянуті в даному стандарті.

Якщо провадять збирання статистичних даних, то провали напруги має бути покласифіковано відповідно до табл. 1.6.

Традиційно поріг початку провалу напруги дорівнює 90 % від номінальної напруги, поріг початку перенапруги — 110 % від номінальної напруги.

Таблиця 1.6 — Класифікація провалів за залишковою напругою та тривалістю [9]

Залишкова напруга, u%	Тривалість t, мс				
	$10 \leq t \leq 200$	$200 \leq t \leq 500$	$500 \leq t \leq 1\,000$	$1\,000 \leq t \leq 5\,000$	$5\,000 \leq t \leq 60\,000$
$90 > u \geq 80$	A1	A2	A3	A4	A5
$80 > u \geq 70$	B1	B2	B3	B4	B5
$70 > u \geq 40$	C1	C2	C3	C4	C5
$40 > u \geq 5$	D1	D2	D3	D4	D5
$5 > u$	X1	X2	X3	X4	X5

Зазвичай, тривалість відключень електропостачання залежить від того, яка стратегія захисту вибрана для будівництва мережі, яка може різнитися залежно від структури мережі та заземлення нейтралі. Тому стандартні часові рамки відключень не завжди відповідають обмеженням, вказаним у табл. 1.6 [9].

Імпульсна напруга ($U_{\text{імп}}$)

Рівень напруги імпульсу описується показником імпульсної напруги. ГОСТ 13109-97 регламентує значення імпульсної напруги для грозових та комутаційних імпульсів, які виникають в мережах електропостачальних організацій [10].

Коефіцієнт тимчасового перенапруги ($K_{\text{пер}U}$)

Короткочасне перевищення напруги вище 110% від номінального значення тривалістю 1000-5000 мкс.

Значення тимчасового коефіцієнта перенапруги загальної точки приєднання до мережі залежить від тривалості перенапруги і не перевищує значення, зазначеного в табл. 1.7 [10].

Таблиця 1.7 - Значення тимчасового коефіцієнта перенапруги [10]

Тривалість тимчасової перенапруги $t_{\text{пер}U}$, с	До 20
Коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер}U}$, в.о	1,31

Висновки до розділу 1

Забезпечення високої якості електроенергії є критичним завданням для стабільної та ефективної роботи енергетичних систем у будь-яких сферах, від побутових до промислових. Несинусоїдність струму та напруги, гармоніки та інші аспекти негативно впливають на електрообладнання, збільшуючи його зношення, спричиняючи втрати енергії та можуть ставити під загрозу безпеку та надійність систем.

Стандарти якості електричної енергії, такі як ДСТУ EN 50160:2023, грають ключову роль у підтримці стабільності напруги та забезпеченні надійної роботи електрообладнання. Вони визначають допустимі межі для таких параметрів як напруга, флікер, гармоніки та інші, що є важливими для забезпечення належної роботи систем.

Крім того, розуміння джерел реактивної потужності та їх вплив на якість електроенергії дозволяє розробляти стратегії з мінімізації негативних наслідків. Врахування гармонійних спотворень, зсуву фаз між напругою та струмом та інших аспектів електричних систем є важливим для забезпечення ефективності та надійності їх функціонування.

Загалом, комплексний підхід до забезпечення високої якості електроенергії, що включає стандартизацію, моніторинг, управління нелінійними навантаженнями та оптимізацію коефіцієнта потужності, дозволяє підвищити надійність та ефективність енергозабезпечення, зменшити експлуатаційні витрати та забезпечити стабільну роботу електрообладнання.

2 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1 Вплив гармонічних спотворень

Гармонійні струми викликають збільшення джоулевих втрат у всіх провідниках, по яких вони протікають, і додаткове підвищення температури в трансформаторах, розподільчих пристроях, кабелях і т.д.

Втрати в асинхронних машинах

Гармонійні напруги (порядку h), що подаються на асинхронні машини, викликають протікання в роторі струмів з частотою вище 50 Гц, які є джерелом додаткових втрат.

Порядки величин:

- практично прямокутна напруга живлення викликає збільшення втрат на 20%.
- напруга живлення з гармоніками $u_5 = 8\%$ (від U_1 , основної напруги), $u_7 = 5\%$, $u_{11} = 3\%$, $u_{13} = 1\%$, тобто загальний коефіцієнт гармонік $THDu$ дорівнює 10%, призводить до додаткових втрат на 6% [5].

Втрати в трансформаторах

Гармонійні струми, що протікають в трансформаторах, викликають збільшення «мідних» втрат через ефект Джоуля і збільшення «залізних» втрат через вихрові струми. Гармонійні напруги відповідають за «залізні» втрати через гістерезис. Зазвичай вважається, що втрати в обмотках зростають як квадрат $THDi$, а втрати в осерді зростають лінійно з $THDu$. У розподільчих трансформаторах, де рівень спотворень обмежений, втрати збільшуються від 10 до 15% [5].

Тепловий вплив на трансформатори

Сучасні промислові та комерційні мережі зазнають впливу гармонійних струмів від нелінійних навантажень, таких як приводи зі змінною швидкістю,

електричні та індукційні печі, флуоресцентне освітлення та домашні розважальні пристрої. Трансформатори під навантаженням можуть генерувати гармоніки в умовах насичення, що збільшує теплові втрати і може скорочувати термін служби ізоляції. Особливо це стосується трансформаторів типу К, призначених для роботи в середовищах із значними гармонійними спотвореннями. У промислових застосуваннях це може призвести до високої робочої температури та зменшення терміну служби обладнання [6].

Різні впливи на конденсаторні батареї

Гармонійні напруги, прикладені до конденсаторів, викликають протікання струмів, пропорційних частоті гармонік. Ці струми спричиняють додаткові втрати.

1. Перенапруження

Підвищена напруга може призвести до перенапруження і скорочення терміну служби батарей конденсаторів. Напруга, температура і струм є факторами, що впливають на стан конденсаторної батареї і призводять до пробою діелектрика. Вихідна реактивна потужність батареї конденсаторів змінюється залежно від квадрата напруги:

$$\text{VAR} = \frac{V^2}{X_c}. \quad (2.1)$$

Робоча напруга в розподільчих системах може підвищуватися при невеликому навантаженні або через спрацювання запобіжників, що ізолюють конденсаторний блок, залишаючи решту блоків під перенапругою. Збільшення номінальної напруги конденсаторного блоку на 5% підвищує його реактивну потужність до 110%. Гармонійні спотворення також сприяють підвищенню напруги на конденсаторних батареях, що є проблемою на промислових об'єктах з нефільтрованими перетворювачами. Стандарт IEEE 182 дозволяє підвищити робочі параметри

конденсаторних батарей, і ці межі слід враховувати при проектуванні фільтрів гармонік [5].

2. Резонансні умови

Резонансні умови виникають, коли реактивний опір конденсаторної батареї дорівнює індуктивному реактивному опору розподільчої системи на певній частоті, створюючи послідовний або паралельний резонанс. При послідовному резонансі імпеданс знижується до резистивної складової, що призводить до великих струмів. При паралельному резонансі імпеданс стає дуже великим, що може викликати перенапругу і пошкодження ізоляції кабелів, трансформаторів та конденсаторів. Резонансна частота може змінюватися з параметрами системи, і збіг з гармоніками посилює спотворення напруги. Використання конденсаторних батарей як фільтрів гармонік із послідовними реакторами може зменшити ці ризики, особливо для п'ятих і сьомих гармонік, які є найбільш поширеними [5].

Тепловий вплив на обертові машини

Подібно до трансформаторів, машини, що обертаються, піддаються тепловому впливу гармонік. Оскільки ефективний опір провідника зростає з підвищенням частоти, хвиля струму, багата на гармоніки, може спричинити більше нагрівання провідників обмотки, ніж синусоїдальна хвиля з тим самим середньоквадратичним значенням. Загальний ефект може призвести до скорочення терміну служби трансформатора.

Генератори

Генератори, що використовуються в електроенергетиці, призначені для лінійних навантажень, але при роботі з нелінійними навантаженнями можуть виникати:

- Струми позитивної та негативної послідовності, що викликають вібрацію і знос підшипників.

- Спотворення сигналу напруги в системі збудження, що ускладнює регулювання напруги.
- Надмірні струми негативної послідовності, що призводять до дисбалансу напруги [6].

2.2 Технології та методи моніторингу, компенсації та фільтрації

У сучасному світі, де електроенергія стала життєво важливим елементом інфраструктури, важливо мати засоби для постійного контролю. Та аналізу якості цієї енергії. Від правильності вибору обладнання залежить не лише стабільність електропостачання, але й ефективність електроприладів, які використовуються в побуті, комерції та промисловості. Вивчення обладнання, допоможе зрозуміти, яким чином це обладнання працює, які показники воно вимірює та як вони впливають на ЯЕ, що подається у мережу.

У цьому розділі ми детально розглянемо обладнання відомої фірми Elspec, яке призначене для моніторингу та аналізу ЯЕ в мережі. Варо відзначити, що усі аналізатори якості електроенергії Elspec оснащені запатентованим алгоритмом PQZIP, що забезпечує безперервний запис сигналу. Це гарантує доступність даних для будь-якої події в мережі, без необхідності встановлювати тригери чи порогові значення.

Моделі аналізаторів відповідають різним потребам та вимогам користувачів щодо моніторингу ЯЕ в будь-якому бізнесу чи застосуванні. Кожен аналізатор оснащений програмним забезпеченням Elspec PQSCADA Sapphire, яке дозволяє керувати живленням та підтримує багато постачальників. За допомогою цього програмного забезпечення можна обчислити близько 5000 параметрів потужності з будь-якою заданою роздільною здатністю для відображення та звітування на основі отриманих даних [11].

Стационарний аналізатор якості електроенергії серії G4400

На сьогоднішньому ринку немає аналізатора ЯЕ, що зрівнюється з BlackBox G4400. Цей високотехнологічний пристрій відрізняється використанням революційного патентованого алгоритму PQZIP для безперервного запису сигналу. Його передові можливості дозволяють передбачити, запобігати та усувати несправності з легкістю, не вимагаючи встановлення тригера або порогового значення для фіксації певної події.

На рис. 2.1 зображений 3-фазний аналізатор ЯЕ класу А серії BlackBox G4400.



Рисунок 2.1 - BlackBox G4400 [11]

Технічні характеристики

Знизу в табл. 2.1 наведені технічні характеристики BlackBox G4400.

Таблиця 2.1 - Технічні характеристики BlackBox G4400 [11]

Серія продуктів	G4410	G4420	G4430
Частота дискретизації напруги, максимальна кількість вібірок/цикл	256	512	1024
Гармоніки напруги (окремі, парні, непарні, загальні) До -	127-й	255-й	511-й
Тип аналого-цифрового перетворювача	16/201 біт		

Продовження таблиці 1.8

Внутрішня пам'ять	128 Мб	4 ГБ	16 ГБ
Виявлення перехідних процесів, мікросекунди (50/60 Гц)	78,1/65,1 мкс	39/32,5 мкс	19,5/16,3 мкс
Порти Ethernet	1	2	2
Живлення через Ethernet (PoE-вихід)	-	1	1
Перепад напруги при втраті живлення (до)	10 с	25 с	25 с
Застосовні стандарти вимірювання	EN50160, IEEE1159, IEEE519, IEC61000-4-15		
Застосовні стандарти електромагнітної сумісності	EN55011, група 1, клас А, EN6100-6-2		
Канали напруги			
Канали	3 фази + нейтраль		
Номінальна повна шкала	1000 В		
Максимальне пікове вим.	8 кВ		
Вхідний опір	3 Мом		
Невизначеність	0,1% від номінального		
Поточні канали			
Канали	3 фази + нейтраль		
Номінальна повна шкала	5 А		
Максимальне пікове вим.	50 А		
Тягар	0,0001 ВА при 5А		
Невизначеність	0,1% від номінального		
Вимірювання частоти			
Основна частота	42,4 Гц до 69 Гц		
Роздільна здатність по частоті	10 мГц		
Точність частоти	±10 мГц		
Фізичний			
Розмір	175 мм x 232 мм x 138 мм		
Вага	1,7 кг		
Джерело живлення			
Робочий діапазон	100 -260 В змінного струму: 50/60 Гц 100-300 В постійного струму		
Допоміжне джерело постійного струму	48 В постійного струму		
Допоміжне живлення - PoE In	PoE In Відповідно до 802.3af		
Синхронізація часу			
Годинник реального часу	20 стор/хв		
GPS	100-200 мкс		
ІРІГ Б	100-200 мкс		
Сервер SNTP	50-100 мкс		
DCF-77	±15 мс		

Портативний аналізатор ЯЕ BlackBox G4500

Портативний пристрій BlackBox G4500 переносить аналізатори ЯЕ та моніторинг потужності на зовсім новий рівень за рахунок передового патентованого алгоритму PQZIP. Цей унікальний алгоритм дозволяє вимірювати, зберігати та аналізувати (безперервно) сигнали форми незалежно від їх розміру.

На рис. 2.2 зображений 3-фазний аналізатор ЯЕ класу А серії BlackBox G4400.



Рисунок 2.2 - BlackBox G4500 [11]

Технічні характеристики

Знизу в табл. 2.2 наведені технічні характеристики BlackBox G4500.

Таблиця 2.2 - Технічні характеристики BlackBox G4500 [11]

Вибірка сигналу	
Частота дискретизації напруги	1024 зразки/цикл
Поточна частота дискретизації	256 зразків/цикл

Продовження таблиці 2.2

Гармоніки напруги (окремі, парні, непарні, загальні) До -	511-й
Гармоніки струму (окремі, парні, непарні, загальні) До -	127-й
Тип аналого-цифрового перетворювача	16/201 біт
Ємність зберігання	
Внутрішня пам'ять	32 ГБ/32 ТБ2
Аналіз ЯЕ	
Виявлення перехідних процесів, мікросекунди (50/60 Гц)	19,5/16,3 мкс
Комунікаційні порти	
Порти Ethernet	3
Зв'язок Wi-Fi (802.11g)	1
Живлення через Ethernet (PoE In-вихід)	1
Цифровий вхід	4
RS-232	1
RS-485	1
Фізичний	
Розміри мм	314 X 84 X 271
Вага	3,7 кг
Контроль	
Комплексний веб-сервер для локального та віддаленого моніторингу та контролю в реальному часі	
Застосовані стандарти	
Еталони вимірювання	EN50160, IEEE1159, IEEE519, IEC61000-4-15, EN61326
Екологічні стандарти	IEC600068-2-1, 2, 6, 27, 30, 75
Стандарти безпеки	EN61010-1:2001 2 видання
Джерело живлення	
Робочий діапазон	100-260 В з.с.:50/60 Гц 100-300 В п.с.
Допоміжне джерело постійного струму	48 В п.с.
Допоміжне постачання	PoE In відповідно до 802.3af
Резервний акумулятор	2 години
Екологічні умови	
Робоча температура	0°C - 50°C
Температура зберігання	-20°C - 60°C
Синхронізація часу	

Продовження таблиці 2.2

Годинник реального часу	±1 секунда на 24 години
GPS	100-200 мкс
ІРІГ Б	100-200 мкс
Сервер SNTP	50-100 мкс
DCF-77	±15 мс
Канали напруги	
Канали	4 (3 фази + нейтраль) + 1 постійний струм
Номінальна повна шкала	1000 В
Максимальне пікове вим.	8000 В
Вхідний опір	3 Мом
Невизначеність	0,1% від номінального
Поточні канали	
Поточні канали	4 (3 фази + нейтраль) + 1 Grn/DC
Поточні канали отримують із затискача	ІІ-І4: 0-10 ВПк І5: 0-3 ВПк
Невизначеність	0,1% ±0,1 мВ
Вимірювання частоти	
Основна частота	42,5 Гц до 69 Гц
Роздільна здатність по частоті	10 мГц
Точність частоти	±10 мГц

Портативний аналізатор ЯЕ Pure BlackBox

Портативний аналізатор якості електроенергії Pure BlackBox вдосконаленою технологією PQZIP, спрощений у використанні: просто треба підключити його і вже можна збирати дані про ЯЕ. Він постійно записує всі параметри без необхідності у налаштуваннях порогів або конфігурації. Приклад доступний у двох варіантах: для однофазних і трьохфазних систем.

На рис. 2.3 зображений портативний аналізатор ЯЕ Pure BlackBox.



Рисунок 2.3 - Pure BlackBox [11]

Технічні характеристики

Знизу в табл. 2.3 наведені технічні характеристики Pure BlackBox.

Таблиця 2.3 - Технічні характеристики Pure BlackBox [11]

Загальний	
Вхід напруги	4 канали, номінальна напруга 100-60 В змінного струму, вимірювання до 1,5 кВ RMS
Поточні канали	4 канали ТТ вихідної напруги (0-10В пік)
Частота лінії	40-70 Гц
Частота дискретизації	46080 Гц
Світлодіодні індикатори	11 Двоколірний світлодіод: стан фіксаторів напруги - 4; стан фіксаторів струму -4; стан SD-карти -1; стан запису PQZ - 1; загальний стан -1
Точність	IEC 61000-4-30, клас А
Спілкування	
LAN	Доступний в модулі розширення
USB	Завантаження файлу PQZ, оновлення програмного забезпечення та налаштування годинника
Потужність	
Джерело живлення	100-240 В змінного струму 50/60 Гц 10 Вт 140-300 В постійного струму 5 В постійного струму через USB
Ride Through	30 сек
Акумулятор	5 год з модулем розширення

Продовження таблиці 2.3

Фізичний	
Вага	0,4 кг
Розміри	180 x 115 x 60
Синхронізація	
Зовнішня синхронізація	NTP доступний у модулі розширення
Внутрішня синхронізація	10 стор/хв
Екологічний	
Робоча температура	від -20°C до + 70°C
Вологість	від 5% до 95% без конденсації
Захист IP	IP40
Зберігання	
Енергонезалежна пам'ять	SD-карта з підтримкою гарячої заміни

2.3 Обладнання призначене для компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонічних спотворень

У сучасному світі електроніка і електричні системи стають все більш складними, що вимагає постійного удосконалення та контролю їх ефективності та безперебійності. Одним із ключових аспектів цього контролю є забезпечення якості електропостачання, що включає в себе компенсацію реактивної потужності та фільтрацію гармонічних спотворень.

Реактивна потужність, що виникає через індуктивні або ємнісні елементи в електричних мережах, може призводити до великих втрат енергії та неефективного використання ресурсів. Запобігання цим втратам стає важливим завданням для ефективної енергетики.

З іншого боку, гармонічні спотворення у струмі або напрузі можуть викликати проблеми в роботі обладнання, спричиняти перегрів, втрати ефективності та навіть приводити до виходу з ладу обладнання. Тому фільтрація гармонік стає критично важливою для забезпечення надійності і безпеки електричних систем.

У цьому розділі ми розглянемо різноманітні типи обладнання, які призначені для компенсації реактивних потужності та фільтрації гармонічних спотворень.

Вивчення їх принципів роботи та застосування допоможе зрозуміти, як забезпечити стабільну та надійну роботу електричних систем у сучасному технологічному середовищі.

Способи компенсації реактивної потужності мають велике значення для оптимізації роботи електричних систем. Серед стандартних методів вирізняються наступні:

- контакторні конденсаторні установки: цей метод включає повільну ступінчасту комутацію конденсаторів, але не має захисту конденсаторів від гармонік;
- дросельні конденсаторні установки: також передбачає повільну ступінчасту комутацію конденсаторів;
- тиристорні (швидкодіючі) конденсаторні установки: цей метод використовує швидкодіючі тиристори для ступінчатої комутації;
- комбіновані конденсаторні установки: вони використовують комбінацію різних методів, але не можуть мати певні недоліки.

Гармонічні фільтри поділяються на пасивні та активні:

- пасивні фільтри: Використовують односмугові або смугові фільтри для забезпечення низькоімпедансного шляху для гармонічних струмів на певних частотах;
- активні фільтри: Працюють у реальному часі, інжектуючи гармонічні струми для скасування існуючих гармонік. Вони бувають постійного, змінного струму, послідовного та паралельного з'єднання;
- гібридні фільтри: Комбінація пасивних і активних схем фільтрації.

Методологія проектування пасивного фільтра включає взаємозв'язок основних параметрів і рекомендації IEEE для вибору компонентів. Наведено приклади застосування з використанням комерційного програмного забезпечення для аналізу фільтрів.

Статичний генератор реактивної потужності (ANSVG (Static Var Generator))

ANSVG – це сучасний напівпровідниковий пристрій, який використовує транзистори IGBT для генерації струму у мережу. Цей струм призначений для приглушення гармонічних складових та компенсації реактивної потужності окремо для кожної фази. Він має ефективність у межах 97-98% та швидкодію 5 мс.

На рис. 2.4 зображений статичний генератор реактивної потужності ANSVG.

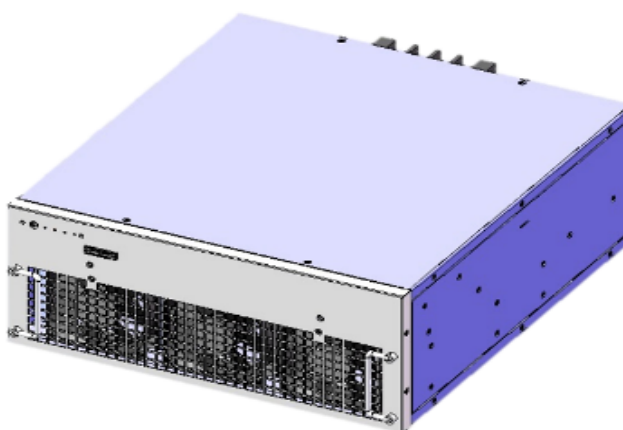


Рисунок 2.4 - статичний генератор реактивної потужності ANSVG [11]

Технічні характеристики

Знизу в табл. 2.4 наведені технічні характеристики ANSVG.

Таблиця 2.4 - Технічні характеристики ANSVG [11]

Номінальна напруга	380 В $\pm 15\%$
Номінальна частота	50 Гц $\pm 2\%$
Метод компенсації	Лінійна компенсація
Час реакції	Повний час відгуку ≤ 5 мс, миттєвий час відгуку ≤ 100 мкс
Частота перемикання	20 кГц
Ефект компенсації	$\geq 0,99$, компенсує ємнісні реактивну та індуктивну реактивну потужність
Самовтрата	$\leq 2\%$
Ефективність	$\geq 98\%$

Продовження таблиці 2.4

Загальна гармоніка розмір компенсації	97%
Спосіб охолодження	Примусове повітряне охолодження
Шум	≤ 60 дБ
Рівень захисту	IP20
Інтерфейс зв'язку	RS485 (Modbus-RTU) або Etheret (Modbus-TCP)
Ємність модуля	30 кВАр, 50 кВАр, 75 кВАр або 100 кВАр
Робоча температура	-10°C + 45°C
Захист від перевантаження	Автоматичне обмеження номінального вихідного струму

Основні вирішувані проблеми ANSVG:

1. досягнення компенсації реактивної потужності на рівні 97-98% для кожної фази окремо в межах потужності системи з швидкодією 5 мс.
2. зниження споживання активної потужності шляхом мінімізації гармонічних спотворень складових напруги в мережі.
3. виправлення несиметрії струму та напруги.
4. зменшення просадок напруги та споживання струму від джерел живлення під час запуску двигунів, які не обладнані пристроями плавного пуску.
5. мінімізація впливу імпульсів струму та напруги на мікропроцесорну техніку, яка особливо чутлива до таких впливів.
6. зниження негативного впливу на точність та надійність систем управління перетворювачами частоти, системи керування ДЕС та іншого напівпровідникового обладнання.
7. підвищення терміну служби електрообладнання за рахунок зменшення впливу гармонічних складових на ізоляцію та нагрів.
8. приведення показників ЯЕ до нормального стану.

Пристрій динамічної компенсації EQ780:60:5-415.50-P7

Пристрій динамічної компенсації EQ780 – це повна система еквалайзера Elspres, яка працює у режимі реального часу. Вона призначена для компенсації реактивної потужності об'ємом 780 кВАр з можливістю регулювати у 13 кроках по 60 кВАр. Крім того, система включає 7% індуктори та розрахована на роботу при напрузі 415 В та частоті 50 Гц.

На рис. 2.5 зображений пристрій динамічної компенсації EQ780.



Рисунок 2.5 - пристрій динамічної компенсації EQ780 [11]

Технічні характеристики

Знизу в табл. 2.5 наведені технічні характеристики EQ780.

Таблиця 2.5 - Технічні характеристики EQ780 [11]

Головна	
Кількість фаз	3
Номінальна напруга	415 В
Номінальна частота	50 Гц
Загальний вихід	780 кВАр
Коефіцієнт налаштування	3,8 (7%)
Режим роботи	Автоматичний
Електричні властивості	
Тип захисту	Запобіжники/вимикач
Перемикання кроків	13

Продовження таблиці 2.5

Розмір кроку	60 кВАр
Кількість груп	5
Максимальний струм	1085 А
Коротке замикання	75 кА
Механічні властивості	
Клас захисту корпусу	IP40/IP54
Висота	210 см
Ширина	160 см
Глибина	60 см
Колір	RAL7035
Макс. температура навк. середовища	40°C
Стандарти	IEC 60439-1 IEC 61010-1 UL

Пристрій EQ780 має наступні переваги:

1. найшвидша система у світі: забезпечує надзвичайно швидку реакцію на зміни в навантаженні, що дозволяє забезпечити стабільність електромережі в реальному часі.
2. енергозбереження/ефективність: завдяки використанню технологій ефективного керування енергією здійснює ефективну компенсацію реактивної потужності.
3. безперехідна комутація твердотільних конденсаторів: забезпечує швидку та безшумну роботу системи.
4. зменшення мерехтіння напруги: забезпечує плавний і стабільний рівень напруги, що позитивно впливає на роботу підключеного обладнання.
5. компенсація перепадів напруги та стабілізація коливань напруги: гарантує стійкість напруги в електромережі навіть під час значних змін навантаження.

6. елементи потужних навантажень: включає в себе конденсатори, котушки індуктивності та тиристори, що робить його ефективним для різних типів навантаження.
7. вбудований аналізатор ЯЕ з програмою самотестування: дозволяє в реальному часі контролювати параметри електромережі і виконувати діагностику пристрою.
8. фільтрація гармонік (пасивна): забезпечує зниження рівня гармонічних складових в електромережі, що дозволяє зменшити негативний вплив на підключене обладнання.

Висновки до розділу 2

Згідно з проведеним дослідженням, гармонічні спотворення в електричних системах мають значний вплив на їхню ефективність та надійність. Гармонійні струми та напруги призводять до збільшення джоулевих втрат у провідниках, підвищення температури в трансформаторах, розподільчих пристроях та інших компонентах системи. Також, гармоніки можуть викликати додаткові втрати в асинхронних машинах, трансформаторах та конденсаторних батареях.

Для забезпечення стабільної та ефективної роботи електричних систем в сучасному світі важливо використовувати технології та методи моніторингу, компенсації та фільтрації. Обладнання відомої фірми Elspec, таке як аналізатори якості електроенергії та прилади для динамічної компенсації, дозволяють контролювати та коригувати параметри електричних систем в реальному часі.

Крім того, методи компенсації реактивної потужності та фільтрації гармонічних спотворень, такі як статичні генератори реактивної потужності та гармонічні фільтри, відіграють важливу роль у забезпеченні стабільності та ефективності електричних систем.

Отже, використання сучасних технологій та методів моніторингу, компенсації та фільтрації є необхідним для забезпечення надійності, ефективності та безпеки електричних систем у сучасному технологічному середовищі.

З ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ НОРМАТИВНОГО РІВНЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРОМИСЛОВОГО СПОЖИВАЧА

Звіт за результатами вимірювань параметрів якості електричної енергії в програмному середовищі. Період вимірювань 03:13 04.04.2020 - 11:52 11.03.2021. Топологія мережі: WYE(зірка). Номінальна лінійна/фазна напруга мережі : 400/230 В (line to line (LL/LN)).

Вимірювання проводилися пристроєм Pure BlackBox компанії Elspes.

Основним завданням роботи є аналіз параметрів результатів за допомогою програмного забезпечення ПЗ PQSCADA Sapphire v1.0.7.28 та встановлення пристрою динамічної компенсації Elspes EQ780 з дроселями 189 Гц.

У розділі описуються результати дослідження показників якості енергосистеми промислового підприємства за допомогою програмного забезпечення ПЗ PQSCADA Sapphire v1.0.7.28. Дослідження було проведено з метою оцінки відповідності показників стандартам ДСТУ EN 50160:2023 "Характеристики напруги електропостачання в системах загального призначення".

Для дослідження використовувалися дані, отримані пристроєм Pure BlackBox компанії Elspes якості електроенергії.

Були проаналізовані такі основні параметри:

- активна потужність;
- THDu та THDi;
- хвилі струму та напруги;
- RMS напруги та струму;
- реактивна потужність.

Результати параметрів енергосистеми до встановлення пристрою динамічної компенсації

1. Активна потужність

На рис. 3.1 зображені результати отриманих значень активної потужності з 03:12 по 03:15 04.04.2020.

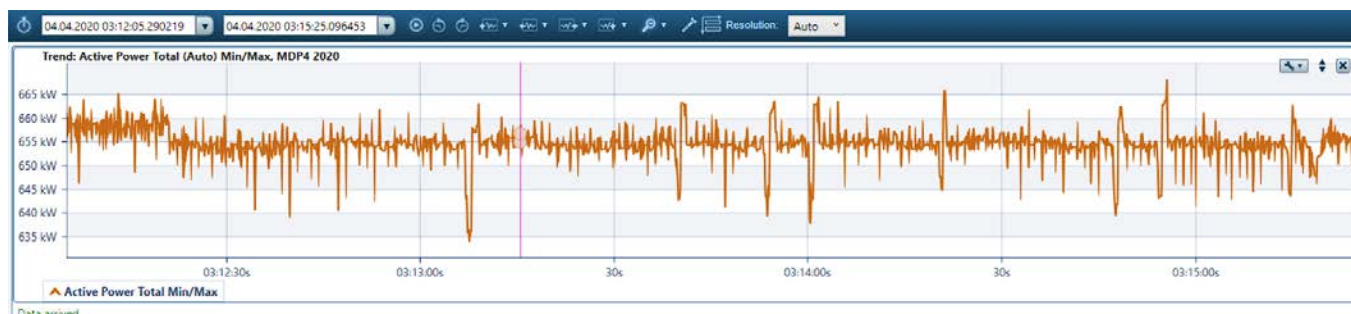


Рисунок 3.1 - Графік активної потужності та меж для звітного періоду

На графіку показано активну потужність протягом певного проміжку часу. Графік показує середню активну потужність протягом кожної секунди.

- Мінімальна активна потужність протягом проміжку часу, що розглядається, становить 633 Вт.
- Максимальна активна потужність протягом проміжку часу, що розглядається, становить 667 Вт.
- Середня активна потужність протягом проміжку часу, що розглядається, становить приблизно 655 Вт.

2. THDu та THDi

На рис. 3.2 зображено два графіки, що відображають динаміку показників THDu та THDi протягом певного часового інтервалу.

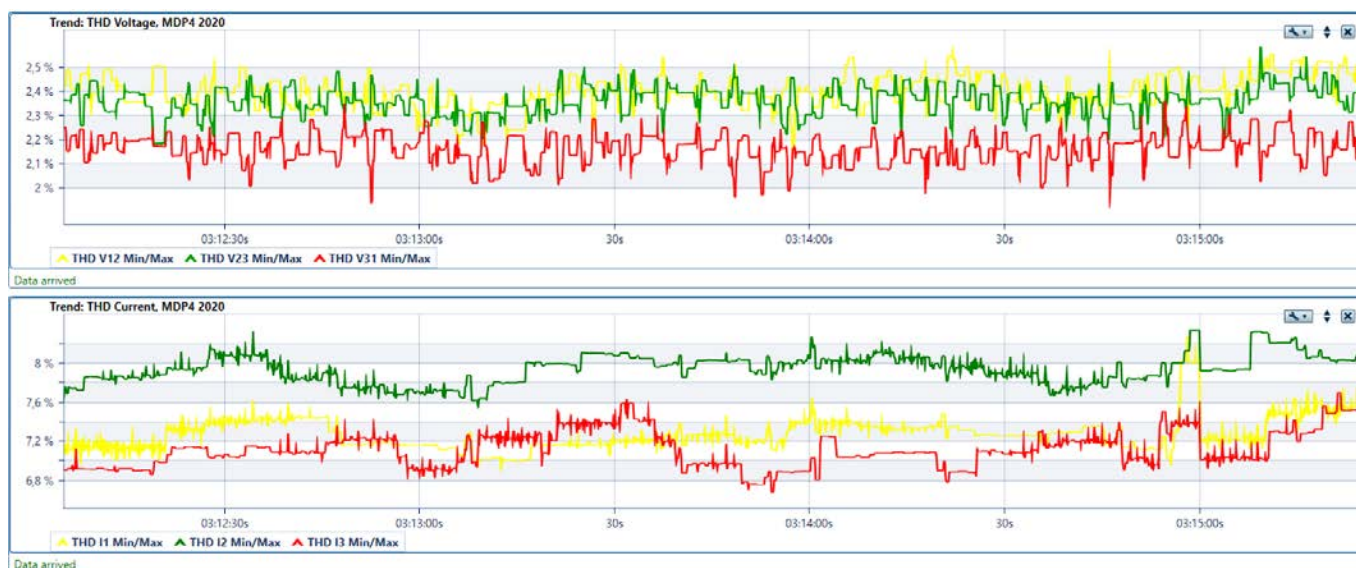


Рисунок 3.2 - Графік THDu та THDi протягом певного часового інтервалу

На першому графіку зображено динаміку THDu протягом 3 хвилин. Ми можемо спостерігати, що значення THDu протягом цього часу варіюються від 1,95% до 2,55%. Це свідчить про те, що форма кривої напруги протягом цього часу була значно спотворена.

На другому графіку зображено динаміку THDi протягом 3 хвилин. Ми можемо спостерігати, що значення THDi протягом цього часу варіюються від 6,8% до 8,2%. Це свідчить про те, що форма кривої струму протягом цього часу також була значно спотворена.

В даному випадку, значення THDu та THDi значно вище допустимих значень. Це може призвести до негативних наслідків, таких як:

- перегрів проводів та кабелів;
- зниження ККД електричних пристроїв;
- пошкодження електричних пристроїв;
- погіршення якості електроенергії.

3. Хвилі струму та напруги

На представленому рис. 3.3 зображено форму хвилі напруги та струму. Хвиля напруги з амплітудою близько 315 В. Хвиля струму з амплітудою близько 1500 А.

Частота хвилі становить близько 50 Гц, що відповідає стандартній частоті мережевої напруги.

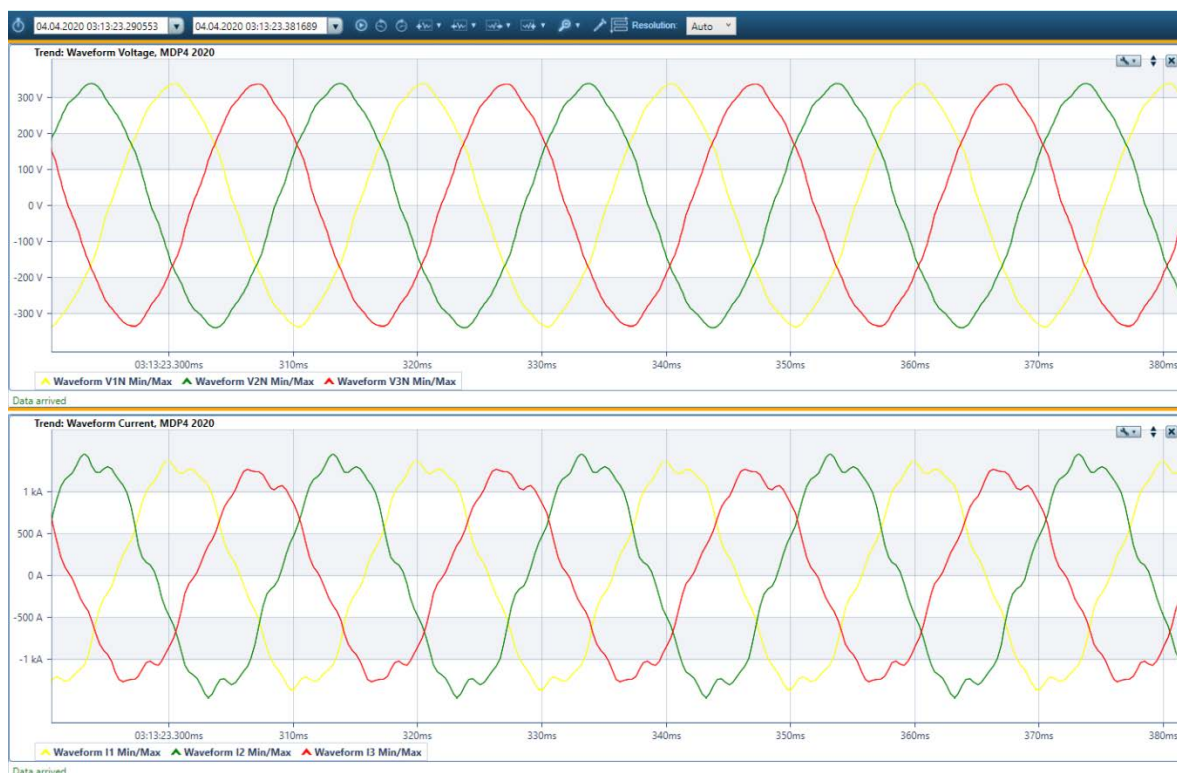


Рисунок 3.3 – Графік форми хвилі напруги та струму

Як ми бачимо на графіку форма хвилі струму напруги та струму є лише наближеними до синусоїдальної форми. Це спричинено навантаженнями на мережу. А саме, нелінійними спотвореннями, які використовуються на підприємстві - електродвигуни та конденсатори.

4. RMS напруги, активна та реактивна потужність

На рис. 3.4 зображений графік активної та реактивної потужності, RMS напруги протягом звітного періоду.



Рисунок 3.4 - Графік активної та реактивної потужності, RMS напруги протягом звітного періоду

На представленому графіку зображено три графіки, що відображають зміни трьох параметрів: активної та реактивної потужності, RMS напруги.

Аналіз скачків напруги

На верхньому графіку можна чітко побачити скачки середнього значення напруги. Найбільший скачок відбувається близько 08:00 та 14:00, коли напруга падає до 210 В. Інші скачки меншого розміру можна побачити близько 07:00, 11:00.

Аналіз скачків реактивної потужності

На наступному графіку також можна побачити скачки реактивної потужності. Найбільший скачок відбувається близько 01:00 та 05:00, коли реактивна потужність різко зростає з 180 кВАр до 1,2 МВАр.

Причини скачків напруги та реактивної потужності є включення та вимкнення конденсаторів. Конденсатори генерують реактивну потужність, тому їх

підключення до мережі призводить до збільшення загальної реактивної потужності в системі.

На рис. 3.5 зображений більш детальний графік RMS напруги та струму, реактивної потужності.



Рисунок 3.5 - Графік RMS напруги та струму, реактивної потужності протягом 30 секунд 05.08.2019

У збільшеному масштабі момент пуску у 2019 році при підключення конденсаторів споживання реактивної потужності біля 1145 кВАр. Зниження напруги з 226 до 214 В на 12 В (5,6%). Додатковий струм з мережі під час пуску $2800 - 1600 = 1200$ А.

Результати параметрів енергосистеми після встановлення пристрою динамічної компенсації Elspec EQ780

1. Активна потужність

На рис. 3.6 зображені результати отриманих значень активної потужності з 11:51 по 11:52 11.03.2021.

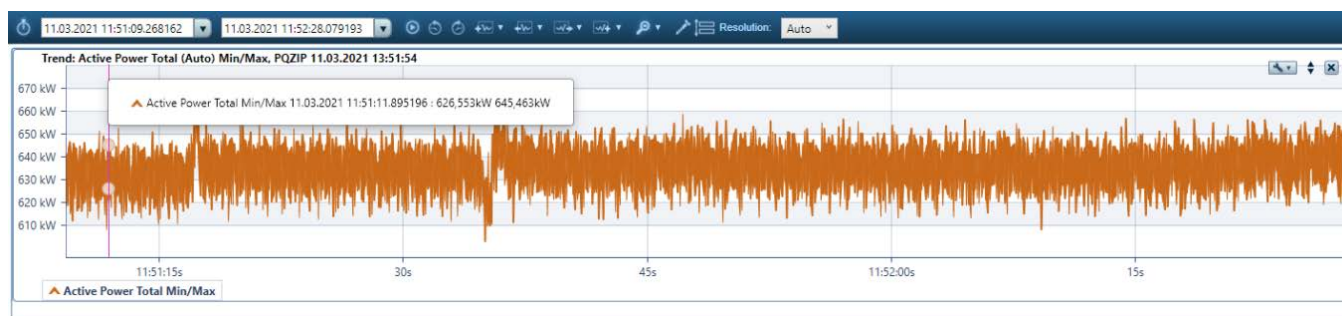


Рисунок 3.6 - Графік активної потужності та меж для звітного періоду

Графік показує середню активну потужність протягом кожної секунди.

- Мінімальна активна потужність протягом проміжку часу, що розглядається, становить 626 Вт.
- Максимальна активна потужність протягом проміжку часу, що розглядається, становить 645 Вт.
- Середня активна потужність протягом проміжку часу, що розглядається, становить приблизно 635,5 Вт.

2. THDu та THDi

На рис. 3.7 зображено два графіки, що відображають динаміку показників THDu та THDi протягом певного часового інтервалу.

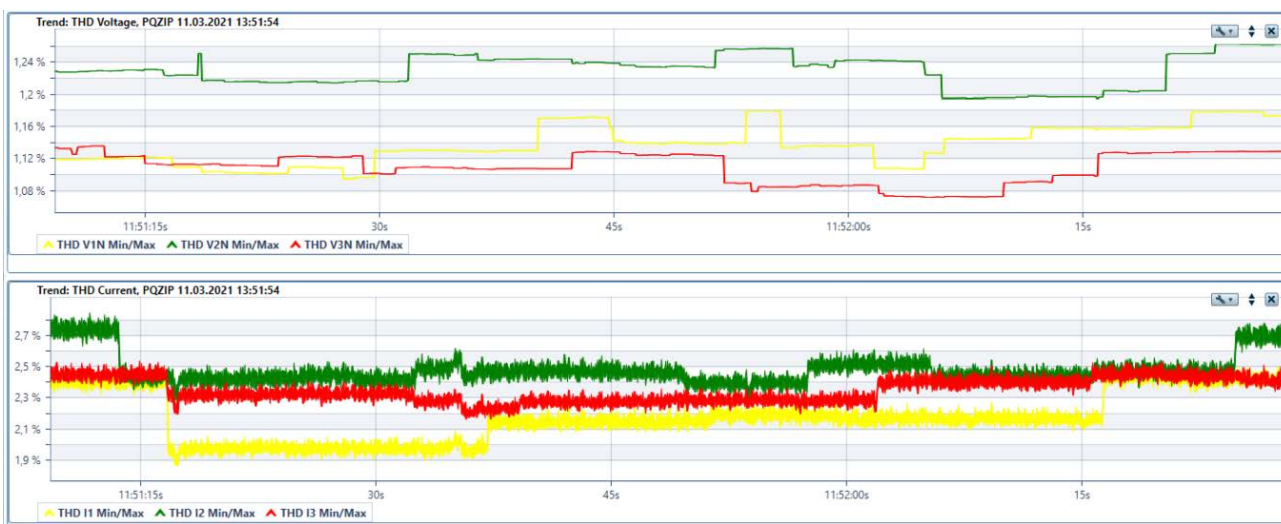


Рисунок 3.7 - Графік THDu та THDi протягом певного часового інтервалу

З графіку можна зробити висновок, що:

- THDu становить 1,24%;
- THDi становить 2,7%.

На рис. 3.6 та рис.3.7 представлені реактивна потужність (за її рівнем можна відстежити моменти включення EQ), а також коефіцієнти нелінійних спотворень напруги (THDV) та струму (THDI). З графіків можна дійти невтішного висновку, що включення установки призводить до зменшення рівня гармонійних спотворень у мережі. Це призводить до зниження втрат, спричинених спотвореннями, а також збільшення терміну служби всього обладнання, підключеного до системи.

3. Хвилі струму та напруги

На представленому рис. 3.8 зображено форму хвилі напруги та струму.



Рисунок 3.8 – Графік форми хвилі напруги та струму

Наочне уявлення, як змінилася форма кривих хвилі напруги та струму після включення EQ. Після включення EQ форма кривої струму стала ближчою до синусоїди.

4. RMS напруги, активна та реактивна потужність

На рис. 3.9 зображений графік активної та реактивної потужності, RMS напруги протягом звітного періоду.



Рисунок 3.9 - Графік RMS напруги та струму, реактивної потужності протягом 40 секунд 11.03.2021

Аналогічний запуск після установки динамічної КУ EQ780 у 2021 році. Споживання реактиву в цей момент близько 447 кВАр. (установка миттєво включилася на повну потужність і компенсувала значну частину реактивної потужності). Зниження напруги з 232,5 до 229 В на 3,5 В (1,5%). Додатковий струм з мережі під час пуску $1100-400=700\text{A}$.

Нижче представлена табл. 3.1 на якій зображено параметри енергосистеми до та після встановлення пристрою динамічної компенсації.

Таблиця 3.1 - Параметри енергосистеми до та після встановлення пристрою динамічної компенсації

Параметр	До встановлення	Після встановлення	Зміна, %
Активна потужність, Вт	655	635,5	3%
Мінімальна активна потужність, Вт	633	626	1,10%
Максимальна активна потужність, Вт	667	645	3,30%
THDu, %	2,55	1,24	51%
THDi, %	8,2	2,7	67%
RMS напруги, %	5,6	1,5	4,10%
Реактивна потужність, кВАр	1145	447	61%
Додатковий струм з мережі під час пуску, А	1200	700	42%

З табл. 3.1 видно, що після встановлення пристрою динамічної компенсації Elspec EQ780 значення середньої активної потужності зменшилося на 3%, THDu зменшився на 51%, THDi зменшився на 67%, рівень просадки напруги знижений більш ніж у 4 рази, споживання реактиву зменшилося на 61%, а додатковий струм з мережі під час пуску зменшився на 42%. Це свідчить про покращення якості електроенергії після встановлення пристрою динамічної компенсації.

Висновки до розділу 3

Розділ включає аналіз параметрів якості електричної енергії за допомогою програмного забезпечення PQSCADA Sapphire v1.0.7.28 та встановлення пристрою динамічної компенсації Elspec EQ780 з дроселями 189 Гц. Вимірювання проводилися з метою оцінки відповідності показників стандартам ДСТУ EN 50160:2023 "Характеристики напруги електропостачання в системах загального призначення". Аналізувалися такі параметри як активна та реактивна потужності, THDu та THDi, хвилі струму та напруги, RMS напруги та струму.

Встановлення пристроїв динамічної компенсації з захисними реакторами дозволила значно (в 3 рази) знизити рівень гармонічних спотворень, що в свою чергу знизило теплове навантаження на трансформатори і кабельні лінії, і збільшило їх ресурс, та дозволило отримати додатковий резерв потужності. За відгукami експлуатації температура трансформаторів теж знизилася при такому ж рівні завантаження.

Також за рахунок швидкодії пристроїв були значно знижені просадки напруги, що підвищило стійкість роботи всього підключеного обладнання. Крім того, зменшилися значення накиду навантаження, величина яких дуже важлива при роботі системи генерації в автономному режимі.

Зменшення на 4% провалів напруги, дозволяє знизити на 2,5% рівень напруги в мережі, переключенням виводів ВН трансформатора. Це додатково допоможе заощадити до 2% споживання активної потужності, та приблизно на 4% знизить пікове навантаження.

ВИСНОВОК

Забезпечення високої якості електроенергії розглядається як складний і багатовимірний процес, що вимагає ретельного аналізу різних параметрів та їх взаємозв'язку для досягнення оптимальної ефективності систем.

На основі отриманих результатів дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Забезпечення високої якості електроенергії: виявлено, що несинусоїдність струму та напруги, а також гармоніки, негативно впливають на електрообладнання, збільшуючи його зношення та спричиняючи енергетичні втрати.

2. Важливість стандартів якості: застосування стандартів, таких як ДСТУ EN 50160:2023, є ключовим для підтримки стабільності напруги та надійності електрообладнання.

3. Комплексний підхід: дослідження показує, що використання комплексного підходу, що включає стандартизацію, моніторинг та управління навантаженнями, дозволяє підвищити надійність та ефективність енергозабезпечення.

Отримані результати підтверджуються кількісними показниками, такими як зниження рівня гармонійних спотворень на 3 рази після встановлення пристроїв динамічної компенсації та зменшення провалів напруги на 4%. Ці дані вказують на покращення якості електроенергії та зменшення витрат енергоресурсів.

Застосування отриманих знань та результатів може мати практичне застосування в енергетичній промисловості та інших галузях, де критично важлива стабільність та ефективність роботи електричних систем. Деякі можливі напрямки подальших досліджень включають розробку нових технологій та методів управління електричними системами, а також впровадження інноваційних рішень у сфері енергетики.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Дослідження спотворень форми напруги мережі при живленні потужного трифазного мостового випрямляча: навч. посіб. для студентів спеціальності141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / [Чиженко О.І., Блінов І.В., Трач І.В. Рибіна О.Б. Чибеліс В.І.]. – КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. – 80 с.
2. «Електричні кола несинусоїдного струму»: Методичні вказівки до виконання розрахункових робіт з дисципліни —Теоретичні основи електротехніки» для підготовки студентів спеціальності —Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання / Уклад.: Є. А Кудря, І. Н. Намацалюк, Ю.В. Перетятко. – К.: НТУУ —КПІ 2016.– 58с.
3. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий : [монография] / И. В. Жежеленко [и др.]; ред. И. В. Жежеленко. - М. : Энергоатомиздат, 2007. - 294 с.
4. Бекиров Э.А. Возобновляемая энергетика Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2016. — 384 с.
5. Ahsan, S.M.; Khan, H.A.; Hussain, A.; Tariq, S.; Zaffar, N.A. Harmonic Analysis of GridConnected Solar PV Systems with Nonlinear Household Loads in Low-Voltage Distribution Networks. Sustainability 2021, 13, 3709.
6. Electrical installation guide. According to IEC international standards. Laurent MISCHLER, 2016. - 580с.
7. Do you use PFC with capacitors without reactors? This might be interesting to you. Стаття Eduard Chevela. URL: <https://www.linkedin.com/in/eduard-chevela-05265478/recent-activity/articles/> (дата звернення 15.05.2024).
8. Франциско К. Де Ла Роса. Гармоніки, енергетичні системи та інтелектуальні мережі. Інженерія та технологія. Бока Ратон, 2015. 274с.
9. ДСТУ EN 50160:2023 Характеристика напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності

10.ГОСТ 13109-97. «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – [Введ. 1999-01-01]. – М.: ИПК Издательство стандартов. – 1999. – 35

11.Knowledge base. Professional power quality articles.
URL: <https://www.elspec-ltd.com/knowledge-base/> (дата звернения 25.04.2024).