

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій
Кафедра електричної інженерії

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ **О. КОЛЛАРОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

« ____ » _____ 2024 р.

Кваліфікаційна робота
магістра

на тему Оцінка впливу несиметрії, несинусоїдності та відхилення
напруги на роботу електричного обладнання підстанції

Виконав студент 2 курсу, групи ЕЛКм-23
(шифр групи)

спеціальності підготовки 141 «Електроенергетика, електротехніка та
(шифр і назва спеціальності підготовки)

та електромеханіка»

_____ **Кирило КІРІЧЕНКО**

(ім'я та прізвище)

_____ (підпис)

Керівник _____ **к.т.н., доц., Л. СЕРГІЄНКО**

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ініціали, прізвище)

_____ (підпис)

Нормоконтроль:

_____ **Е. НЕМЦЕВ**

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

_____ (дата)

_____ (дата)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД
«ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**

Факультет машинобудування, електроінженерії та хімічних технологій

Кафедра електричної інженерії

Освітній ступінь: магістр

Спеціальність: електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри

_____ (О. КОЛЛАРОВ)

«_____» _____ 2024 р.

**ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ**

Кирило КІРІЧЕНКО

(ім'я та прізвище)

1. Тема роботи: Оцінка впливу несиметрії, несинусоїдності та відхилення
напруги на роботу електричного обладнання підстанції

керівник роботи Ліана СЕРГІЄНКО, канд. техн. наук, доцент
(ім'я та прізвище, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від _____ № _____

2. Строк подання студентом роботи 10 грудня 2024 року

3. Вихідні дані до роботи: Номінальна напруга: 35 кВ. Частота:
50 Гц. Загальна потужність: 15 МВА. Допуск відхилення напруги: $\pm 5\%$.

Межа гармонійних спотворень: 8%. Асиметрія напруги: 2,5%. Коефіцієнт
потужності ($\cos \varphi$): 0,95. Номінальний струм (I_n): 240 А. Струм короткого
замикання (I_{K3}): 16 кА. Дисбаланс навантаження (різниця струмів між
фазами): 15 А. Номінальна потужність трансформатора: 10 МВА.

Потужність батареї конденсаторів: 2,5 МВАр. Максимальне коливання
напруги: 3%. Максимальний струм навантаження на фазу: 250 А.

Максимальна інтенсивність мерехтіння (P_{st}): 0,9. Опір трансформатора:
5%. Імпеданс лінії: 0,5 Ом. Падіння напруги через відхилення: $\pm 5\%$ для
номінальної напруги (35 кВ). Перерозподіл струму через дисбаланс
навантаження: дисбаланс навантаження викликає перерозподіл струму.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

1. Огляд питань порушень та забезпечення якості електропостачання на електричних підстанціях.

2. Огляд питань якості електричної енергії, що впливають на роботу обладнання підстанцій.

3. Оцінка впливу порушення якості електропостачання на роботу обладнання електричної підстанції.

4. Моделювання процесів порушення якості електропостачання на електричній підстанції.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, якщо передбачається)

Одинадцять слайдів презентаційного матеріалу.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Ініціали, прізвище та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділи 1 – 4	Л. СЕРГІЄНКО, доц. каф.		
Нормоконтроль	Е. НЕМЦЕВ		

7. Дата видачі завдання 30 вересня 2024 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розділ 1	30.09.2024 - 03.10.2024	
2.	Розділ 2	04.10.2024 - 07.10.2024	
3.	Розділ 3	08.10.2024 - 11.10.2024	
4.	Розділ 4	12.10.2024 - 10.12.2024	

Студент _____
(підпис)

Кирило КІРІЧЕНКО _____
(ім'я та прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ліана СЕРГІЄНКО _____
(ім'я та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Кирило КІРІЧЕНКО. Оцінка впливу несиметрії, несинусоїдності та відхилення напруги на роботу електричного обладнання підстанції / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього рівня «магістр» за спеціальністю 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. – ДВНЗ ДонНТУ, Дрогобич, 2024.

Дипломна робота складається зі вступу, основної частини, яка включає чотири розділи, висновків, списку використаної літератури та додатків.

У першому розділі здійснено огляд питань порушень та забезпечення якості електропостачання на електричних підстанціях.

У другому розділі були оглянуті питання якості електричної енергії, що впливають на роботу обладнання підстанцій.

У третьому розділі здійснена оцінка впливу порушення якості електропостачання на роботу обладнання електричної підстанції.

У четвертому розділі було здійснено моделювання процесів порушення якості електропостачання на електричній підстанції.

Ключові слова: електрична підстанція, гармонійні спотворення, відхилення напруги, флікер, якість електричної енергії, обладнання підстанції, несиметрія

SUMMARY

Kyrylo KIRICHENKO. Development of an intelligent diagnostic system for the operation of an asynchronous motor in the drive of technological equipment / Graduation qualifying work for obtaining an educational level «master» in specialty 141 Electricity, electrical engineering and electromechanics. – DVNZ DonNTU, Drohobych, 2024.

The thesis consists of an introduction, the main part, which includes four chapters, conclusions, a list of references, and appendices.

In the first chapter, a review of issues related to power supply quality violations and ensuring the quality of electricity supply at electrical substations is provided.

The second chapter reviews the issues of electrical energy quality that affect the operation of substation equipment.

The third chapter evaluates the impact of power supply quality disturbances on the operation of electrical substation equipment.

In the fourth chapter, a simulation of power supply quality disturbances at an electrical substation was performed.

Keywords: electrical substation, harmonic distortion, voltage deviation, flicker, electrical energy quality, substation equipment, asymmetry.

ЗМІСТ

	стор.
ВСТУП	7
1 ОГЛЯД ПИТАНЬ ПОРУШЕНЬ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ	9
1.1 Асиметрія напруги та її вплив на компоненти електричних підстанцій	9
1.2 Гармонійні спотворення (несинусоїдальність) форм напруг та струмів	13
1.3 Відхилення напруги	18
1.4 Мерехтіння та коливання напруги. Флікер.	21
2 ОГЛЯД ПИТАНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЙ	24
2.1 Загальні проблеми забезпечення якості електричної енергії	24
2.2 Вплив порушення якості електропостачання на обладнання підстанції	26
2.3 Огляд наукових статей по темі кваліфікаційної роботи	40
3 ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОРУШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА РОБОТУ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПІДСТАНЦІЇ	48
3.1 Оцінка і розрахунок параметрів порушення якості електричної енергії	48
3.2 Підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення несиметрії у мережі	58
4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОРУШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНІЙ ПІДСТАНЦІЇ	63
ВИСНОВКИ	74
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	76
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА	80
ДОДАТОК Б. ПЕРЕЛІК ЗАУВАЖЕНЬ НОРМОКОНТРОЛЕРА	84

ВСТУП

Сьогодення характеризується критичним станом питання забезпечення якості електричної енергії на електричних підстанціях. Найбільшого занепокоєння заслуговують наступні фактори: асиметрія напруги, несинусоїдальність, відхилення та мерехтіння напруги. У сучасних енергетичних системах ці явища мають значний вплив на роботу та надійність роботи обладнання підстанцій, що може призвести до неефективності, збільшення втрат і скорочення терміну служби електричних компонентів підстанції.

Асиметрія напруги виникає в основному через незбалансованість роботи навантаження і може викликати додаткові термічні та механічні навантаження на електроенергетичне обладнання, що в кінцевому випадку погіршує ефективність їх роботи. Несинусоїдальна напруга, часто спричинена наявністю гармонік, що генеруються нелінійними навантаженнями, що ще більше посилює деградацію електричного обладнання через перегрів та пошкодження ізоляційних матеріалів. Відхилення напруги, включаючи падіння, сплески та мерехтіння (флікер), які виникають у результаті коливання роботи навантажень і виникнення збоїв у мережі, що створює значні ризики для роботи чутливого обладнання.

Аналіз питань якості електричної енергії є важливим для забезпечення надійного та ефективного функціонування електричних підстанцій. Існуючі стандарти – ДСТУ 13109-97, EN 50160 і IEEE Std 519 – містять рекомендації щодо припустимих показників асиметрії, гармонійних спотворень і відхилень напруги, що вимагає забезпечення постійного моніторингу параметрів роботи обладнання підстанцій. Вирішення зазначених проблем сприяє більш надійній роботі підстанцій та забезпеченні можливості управління якістю електричної енергії.

Метою даного дослідження є оцінка впливу асиметрії напруги, несинусоїдальності та відхилення напруги на працездатність та надійність обладнання електричної підстанції.

Завдання роботи:

- проаналізувати причини та механізми виникнення несиметрії, несинусоїдальності та відхилень напруги на електричних підстанціях,
- оцінити вплив зазначених порушень на якість електричної енергії та на обладнання підстанції.
- розробка заходів для зменшення негативного впливу зазначених факторів на обладнання електричної підстанції.

Актуальність роботи: якість електричної енергії є ключовим фактором забезпечення надійності та ефективності роботи підстанції. Асиметрія напруги, несинусоїдальність і відхилення напруги поширені в сучасних енергосистемах можуть призвести до збільшення втрат, скорочення терміну служби обладнання та неефективності його роботи.

Предметом дослідження є вплив порушень якості електричної енергії на працездатність, продуктивність і надійність обладнання електричних підстанцій.

Об'єктом дослідження є обладнання електричної підстанції, на роботу яких безпосередньо впливає порушення якості електричної енергії.

1 ОГЛЯД ПИТАНЬ ПОРУШЕНЬ ТА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНИХ ПІДСТАНЦІЯХ

1.1 Асиметрія напруги та її вплив на компоненти електричних підстанцій

Асиметрія напруги є досить чутливою проблемою, що виникає при експлуатації електричних підстанцій. Вплив на трансформатори, автоматичні вимикачі, збірні шини та батареї конденсаторів є суттєвою, що призводить до збільшення втрат, перегріву, зниження ефективності та порушення механізмів захисту. Асиметрія напруги є суттєвою проблемою при огляді питання забезпечення якості електричної енергії на електричних підстанціях, що може призвести до небажаних наслідків при роботі різних типів електричного обладнання. Асиметрія виникає, коли величини або фазові кути напруг у трифазній системі відхиляються від їх «ідеальних» збалансованих значень. Це явище часто спричинено незабезпеченням балансу навантаження, асиметричними опорами споживачів у мережі або обривом фази (фаз). Вплив асиметрії можна спостерігати на таких складових частинах (обладнанні) підстанції: трансформатори, автоматичні вимикачі та струмопровідні шини. Так, при цьому можна спостерігати збільшення втрат, перегрів, зниження ефективності роботи та скорочення терміну служби як окремих компонентів так і обладнання в цілому [1].

У збалансованій трифазній системі фазні напруги U_a , U_b , і U_c мають однакові величини (амплітуди) та різняться по фазі на 120° . Асиметрію напруги можна кількісно визначити шляхом розкладання даних напруг на окремі компоненти – напруги зворотної та нульової послідовності. Даний метод аналізу дозволяє розкласти незбалансовану систему на три набори збалансованих векторів: прямої, негативної та нульової послідовності [2].

Симетричні компоненти для фазних напруг можна розрахувати за допомогою наступного набору рівнянь [2]:

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{U_a + U_b + U_c}{3}, \\ U_1 &= \frac{U_a + aU_b + a^2U_c}{3}, \\ U_2 &= \frac{U_a + a^2U_b + aU_c}{3}, \end{aligned} \quad (1.1)$$

де U_0 – складова напруги нульової послідовності, В,

U_1 – складова напруги прямої послідовності, В,

U_2 – складова напруги зворотної послідовності, В,

a – одиничний вектор, який може бути визначеним як $a = e^{j120^\circ}$, що являє собою фазовий зсув 120° .

Коефіцієнт несиметрії напруги визначається як відношення величини складової напруги зворотної послідовності U_2 до складової напруги прямої послідовності U_1 [2]:

$$k_{UF} = \frac{|U_2|}{|U_1|} \cdot 100\% \quad (1.2)$$

Національні та європейські стандарти (ДСТУ 13109-97 та EN 50160), визначають граничні значення даного коефіцієнта. Для промислових систем асиметрія напруги не повинна перевищувати 2%, однак дана величина може варіюватися залежно від чутливості обладнання та стану навколишнього середовища.

Особливо критичним є вплив асиметрії напруги на силові трансформатори. У симетричних системах магнітний потік, що створюється в осерді трансформатора, також є симетричним, що дозволяє мінімізувати втрати в ньому. При виникненні асиметрії напруги магнітний

потік спотворюється, що може призвести до виникнення додаткових вихрових струмів і втрат на гістерезис. Величину збільшення втрат на вихрові струми через асиметрію можна наближено оцінити за залежністю [2]:

$$\Delta P_{\text{вс}} \equiv \left(\frac{\Delta U}{U_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (1.3)$$

де ΔU – відхилення напруги від номінального значення, В,

$U_{\text{ном}}$ – номінальна робоча напруга в системі, В.

Крім втрат в осерді, асиметрія напруги призводить до протікання незбалансованих струмів в обмотках трансформатора. Це може викликати локалізовані зони нагрівання, особливо в обмотках, що схильні до впливів великих струмів. Це потенційно може призвести до перегріву та прискореного старіння ізоляції провідників обмоток. Підвищення температури через незбалансоване навантаження можна оцінити за допомогою рівняння [2]:

$$\Delta T = k_{\text{тр}} \cdot \left(\frac{I_{\text{ас}}}{I_{\text{ном}}} \right)^2 \quad (1.4)$$

де $k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт, величина якого залежить від конструктивних особливостей трансформатора та умов охолодження,

$I_{\text{ас}}$ – струм в обмотках, що виникає через наявність асиметрії, А,

$I_{\text{ном}}$ – номінальний струм трансформатора, А.

Неоднаковість (асиметрія) навантаження впливає на загальне значення ККД трансформатора, оскільки при цьому виникає необхідність компенсації додаткових втрат. Додаткові втрати проявляються у вигляді збільшення втрат міді обмоток і «залізі» осердя, що призводить до зниження загального ККД, що можна оцінити виразом [2]:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{\text{ном}} - \Delta P_{\text{втр.}}}{P_{\text{ном.}}} \quad (1.5)$$

де P_2 – вихідна потужність трансформатора, Вт,

P_1 – вхідна потужність трансформатора, Вт,

$\Delta P_{\text{втр.}}$ – додаткові втрати через наявність асиметрії, Вт,

$P_{\text{ном}}$ – номінальна потужність трансформатора, Вт.

Іншим ключовим компонентом підстанцій, на які впливає асиметрія напруги, є автоматичні вимикачі. Конструкція автоматичних вимикачів розроблена для роботи в умовах збалансованого навантаження, а їх робочі параметри відключення часто відкалібровані відповідно до зазначених умов навантаження. При виникненні асиметрії напруги, незбалансований струм може призвести до передчасного відключення або затримки у відключенні. Зазначене не тільки погіршує можливості по захисному спрацюванню але й піддає контакти вимикача надмірному зношенню через нерівномірний розподіл струму по фазах вимикача. Струм відключення може бути схарактеризований наступною залежністю, А [2]:

$$I_{\text{відкл.}} = I_{\text{уст.}} \cdot \frac{U_1}{U_{\text{ном}}} \quad (1.6)$$

де $I_{\text{уст.}}$ – струм уставки вимикача, А,

U_1 – напруга прямої послідовності, В.

Зі збільшенням величини несиметрії величина напруги прямої послідовності відхиляється від номінальної, що призводить до неточностей у роботі вимикача.

Шинопроводи підстанцій також є вразливими до впливу асиметрії напруги. У збалансованих умовах шини рівномірно розподіляють потужність між електричними ланцюгами. Однак за наявності асиметрії нерівномірність навантаження призводить до підвищених втрат у

провідниках, збільшуючи ризик їх перегріву та зростання механічних напружень. Втрати потужності в шинах через наявність асиметрії можна схарактеризувати залежністю [2]:

$$\Delta P_{\text{шин}} = I^2 \cdot R \cdot \left(1 + \frac{\Delta I}{I_{\text{ном}}}\right) \quad (1.7)$$

де I – струм через шину, А,

R – активний опір шини, Ом,

ΔI – дисбаланс струму, що виникає внаслідок асиметрії напруги, А.

Асиметрія може викликати підвищену вібрацію та механічні напруження в шинах, що з часом може призвести до їх механічної втоми.

Асиметрія напруги також впливає на інші компоненти підстанції, наприклад, такі як батареї конденсаторів, що використовуються для компенсації реактивної потужності. Під впливом незбалансованих напруг конденсатори піддаються нерівномірному навантаженню, що призводить до перевантаження окремих фаз і подальшого виходу з ладу через надмірне нагрівання. При асиметрії напруг фазні напруги стають відмінними, що призводить до непропорційного розподілу реактивної потужності, що перенавантажує конденсатори.

1.2 Гармонійні спотворення (несинусоїдальність) форм напруг та струмів

Гармонійні спотворення виникають через нелінійні навантаження, такі як перетворювачі електроенергії та промислове обладнання, які вводять гармоніки вищого порядку в джерело живлення. Ці гармоніки збільшують загальні гармонічні спотворення (ГС), що призводить до

надмірного нагрівання окремих компонентів системи, зниження ефективності та потенційних проблем із резонансом у трансформаторах і двигунах. Державні стандарти встановлюють прийнятні значення нормативних та граничних значень ГС в електричних мережах.

Гармонійні спотворення (несинусоїдальність) форм сигналів напруг/струмів є досить критичною проблемою в енергосистемах і суттєво впливає на якість електричної енергії. Гармоніки відносяться до синусоїдальних компонентів напруги/струму, частоти яких є цілими числами, кратними основній частоті системи (50 Гц). Дані компоненти «вводяться» переважно нелінійними навантаженнями, такими як перетворювачі потужності, випрямлячі та промислове обладнання, які спотворюють форми сигналів напруг/струмів, викликаючи їх відхилення від «ідеальної» синусоїдальної форми. Дані спотворення досить сильно впливають на електричне обладнання підстанції (трансформатори, автоматичні вимикачі, збірні шини та батареї конденсаторів), що призводить до збільшення втрат, перегріву та зниження загальної ефективності. Форма хвилі напруг (струмів) за наявності гармонійних коливань може бути виражена як сума основної складової та гармонійних складових, миттєве значення напруги в будь-який момент часу може бути визначено за залежністю, В [3]:

$$U(t) = U_1 \sin(\omega t) + \sum_{n=2}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (1.8)$$

де U_1 – амплітуда напруги основної частоти, В,

U_n – амплітуда напруги n -ї гармоніки, В,

$n\omega t$ – кутова частота n -ї гармоніки,

ϕ_n – фазовий кут n -ої гармоніки.

Загальним показником гармонійних спотворень, яке кількісно визначає величину всіх гармонійних компонентів відносно основного

компонента [3]:

$$k_U = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% \quad (1.9)$$

де U_1 – середньоквадратичне значення напруги основної частоти, В,

$U_2, U_3, \dots, U_n$ – середньоквадратичні значення напруг гармонік, В.

У системах живлення державні стандарти встановлюють обмеження для прийнятних рівнів даного коефіцієнта (табл. 1.1) [4].

Таблиця 1.1 – Значення коефіцієнтів викривлення синусоїдальності напруги

$U_{ном}, \text{кВ}$	$k_U, \%$	
	Нормально припустимі	Гранично припустимі
0,38	8	12
6-20	5	8
35	4	6
110-330	2	3

Трансформатори є основними компонентами електричних підстанцій, на який впливають гармонічні спотворення. Гармонічні струми, що циркулюють по обмоткам трансформатора, призводять до збільшення втрат у міді та осерді. Додаткові втрати в обмотках через наявність гармонійних струмів можуть бути визначені за залежністю, Вт [3]:

$$P_{обм} = I_1^2 R + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R \quad (1.10)$$

де I_1 – середньоквадратичне значення струму основної частоти, А,

I_n – середньоквадратичне значення струму n -ї гармоніки, А,

R – активний опір обмотки, Ом.

Зі збільшенням значення і кількості гармонійних струмів втрати в обмотках зростають пропорційно квадрату струму, що призводить до підвищення робочих температур і до потенційного пошкодження ізоляції. Гармоніки викликають також вихрові струми в осерді трансформатора, викликаючи додаткові втрати, Вт [3]:

$$P_{oc} \equiv \sum_{n=2}^{\infty} n^2 I_n^2 \quad (1.11)$$

Гармоніки вищого порядку (тобто гармоніки з більшим значенням n) сприяють більшим втратам на вихрові струми.

Гармоніки збільшують втрати в шинах через скін-ефект, коли струми високої частоти мають тенденцію протікати поблизу поверхні провідника. Опір шини зростає з частотою і тим самим збільшуються втрати потужності, які можна виразити за залежністю [3]:

$$P_{ш} = I^2 \cdot R(f) \quad (1.12)$$

де I – струм через шину, А,

$R(f)$ – частотно-залежний опір, що зростає зі збільшенням частоти гармонік.

На вищих гармонійних частотах ефективний опір шини зростає, що призводить до збільшення величини втрат та появи ризику перегріву. З часом це може погіршити стан ізоляції та структурну цілісність шин.

Блоки конденсатори також є особливо чутливими до гармонійних струмів, оскільки загальне значення опору конденсатора зменшується зі

зростанням частоти. На вищих гармоніках це значення стає дуже низьким, що призводить до ще більшого зростання значення гармонійних струмів, що протікають через конденсатори. Високі значення цих струмів можуть викликати перегрів, пробій діелектрика та остаточний вихід з ладу батареї конденсаторів.

Автоматичні вимикачі на підстанціях використовуються для переривання потоку струму з огляду на його величину та оперативних перемикачів. За наявності гармонік середньоквадратичне значення струму збільшується викликаючи передчасне спрацьовування вимикачів або їх хибну роботу. Струм відключення в мережах, що містять гармоніки, можна наближено визначити за залежністю, А [3]:

$$I_{\text{відкл.}} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2} \quad (1.13)$$

де I_1 – струм на основній частоті, А,

$I_2, I_3, \dots, I_n$ – струми гармонік, А.

Гармонічні струми, що не можуть бути поглинені або відсутня можливість боротьби з ними, повинні бути враховані під час калібрування вимикачів.

У загалі, для зменшення впливу гармонійних спотворень, необхідно обов'язкове застосування фільтрів гармонік, конструкція яких визначається наявністю конкретного спектру гармонік у мережі та ступенем чутливості електричного обладнання. Гармонійні спотворення є основним фактором, який погіршує роботу обладнання електричних підстанцій. Гармоніки збільшують втрати, викликають перегрів і знижують ККД трансформаторів, порушують функціонування збірних шин, батарей конденсаторів і автоматичних вимикачів.

1.3 Відхилення напруги

Відхилення напруги стосується коливань номінального значення напруги, які можуть виникати через зміни навантаження, операційних перемикачів або при виникненні несправності в мережі. Стійкі відхилення напруги, такі як падіння або зростання, негативно впливають на роботу обладнання підстанції та можуть призвести до виходу з ладу надчутливих пристроїв. Відхилення напруги є значною проблемою для забезпечення якості електричної енергії і характеризується тим, що фактичний рівень напруги в електричній системі відхиляється від свого номінального або номінального значення. Часті випадки відхилення напруги можуть серйозно вплинути на роботу обладнання електричної підстанції, призводячи до неефективної роботи, скорочення терміну служби обладнання та до підвищення вірогідності його пошкодження. Державні стандарти регулюють прийнятні рівні відхилення, щоб забезпечити роботу обладнання в прийнятних межах. Причинами відхилень напруги можуть бути: коливання роботи навантаження, комутації, несправності в мережах та інтеграція відновлюваних джерел енергії до існуючих систем. Для забезпечення надійної роботи обладнання підстанцій та підтримки якості електричної енергії, важливо кількісно визначити, змодельовати та здійснити пошук шляхів для пом'якшення впливу відхилення напруги на обладнання. В «ідеальній» електричній системі напруга, що подається на обладнання, повинна залишатися незмінною на рівні номінального значення. Однак у реальних системах напруга коливається через різні динамічні фактори, такі як зміна умов навантаження, опір лінії електропередачі та дисбаланс реактивної потужності. Зв'язок між напругою живлення та напругою на навантаженні в електричній системі можна виразити за допомогою простої моделі лінії електропередачі на основі законів електротехніки [5]:

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ном}} - I \cdot (r + jx) \quad (1.14)$$

де I – струм, що протікає через систему, А,

r – опір лінії електропередачі, Ом,
 x – реактивний опір лінії передачі, Ом.

За зміною навантаження слідує зміна струму, що призводить до падіння напруги на опорах лінії передачі, що призводить до відхилення напруги на клеммах навантаження. Відхилення від номінальної напруги кількісно характеризують у відсотках [5]:

$$\delta U = \frac{U_{\text{л}} - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (1.15)$$

Перепади напруги є небажаним, оскільки вони впливають на роботу обладнання підстанції, які розроблені та розраховані для роботи в певному діапазоні напруг. Коли напруга відхиляється від цього діапазону збільшуються втрати, спостерігається надмірне нагрівання струмопровідних частин, зниження ефективності перетворення енергії та інші негативні чинники. Під час виникнення перенапруг підвищене її значення призводить до вищих значень струмів замикання, що перевищують встановлені потужності вимикаючих пристроїв, що потенційно може призвести до їх пошкодження і ставить під загрозу безпеку роботи енергетичних систем. Відхилення напруги має також шкідливий вплив на конденсаторні батареї, які зазвичай використовуються на підстанціях для компенсації реактивної потужності. Це пояснюється тим, що реактивна потужність, яка генерується конденсаторами, є пропорційною квадрату напруги на них. Під час виникнення перенапруг реактивна потужність, що постачається конденсатором, зростає непропорційно, що може призвести до надмірної компенсації та можливого пошкодження через надмірне нагрівання [3].

Для пом'якшення несприятливих наслідків відхилень напруги можна застосовувати різні стратегії керування. Одним із найпоширеніших

підходів є використання автоматичних регуляторів напруги, які мають здатність динамічного регулювання та стабілізації вихідної напруги. Дані регулятори гарантують, що вихідна напруга залишається в допустимих межах, мінімізуючи ризик пошкодження обладнання та покращуючи загальну стабільність системи. Іншим заходом для запобігання відхиленням напруги є використання пристроїв компенсації реактивної потужності, які регулюють потік реактивної потужності в системі та допомагають стабілізувати значення напруги. Останнє відіграє важливу роль для зменшенні коливань напруги, викликаних коливаннями навантаження, і покращення загальної якості електричної енергії в системі [5].

У підсумку можна сказати, що відхилення напруги є критичним фактором та визначником для роботи електричних підстанцій, впливає на продуктивність і надійність роботи електричного та електромехнічного обладнання. Перевищення напруги понад номінальне значення призводить до виникнення надмірних втрат, перегрівів та пошкодження обладнання, а падіння напруги призводять до неефективної роботи та також до збільшення втрат енергії. Тому досить важливо запроваджувати ефективні стратегії регулювання напруги та принципи компенсації реактивної потужності. Запорукою вирішення даної проблеми може бути здійснення постійного моніторингу та керування відхиленнями напруги з метою забезпечення відповідності роботи обладнання підстанції до проектних вимог, тим самим підвищуючи ефективність і довговічність роботи даних енергооб'єктів.

1.4 Мерехтіння та коливання напруги. Флікер.

Мерехтіння (флікер) означає швидкі коливання напруги, спричинені раптовими змінами навантаження, особливо потужного промислового обладнання. Ці коливання можуть викликати візуальний дискомфорт у системах освітлення та погіршити роботу чутливих електричних пристроїв. Стандарти якості електроенергії, наприклад, ДСТУ 13109-97, встановлюють обмеження на допустимі рівні мерехтіння для забезпечення комфорту та стабільної роботи обладнання. Мерехтіння та коливання напруги є критичними показниками якості електричної енергії і виникають через швидкі або періодичні зміни рівнів напруги в електричній системі. Мерехтіння характеризується видимими коливаннями інтенсивності світла, спричиненими коливаннями напруги, що може призвести до дискомфорту та погіршити виконання виробничих процесів, що залежать від стабільного освітлення. Коливання напруги, як правило, відносяться до періодичних або аперіодичних коливань величини напруги, як правило, внаслідок зміни умов навантаження, операцій перемикання або несправностей в електричній мережі. І флікер, і коливання напруги можуть істотно вплинути на стабільність роботи обладнання електричної підстанції, призводячи до збільшення втрат, зниження ефективності обладнання та можливого виходу його з ладу [6].

Коливання напруги може «реалізуватися» в різних форматах і формах, таких як короточасні «провали», «стрибки» або довготривалі відхилення від номінального значення. Такі варіації можна кількісно визначити за значеннями відповідних напруг [6]:

$$\Delta U = \frac{U_{\max} - U_{\min}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\% \quad (1.16)$$

де $U_{\max}$, $U_{\min}$ – відповідно максимальне та мінімальне значення напруги, що спостерігаються протягом певного періоду коливань, В.

Коливання напруги часто можуть бути викликані приєднанням потужних промислових споживачів (дугові печі, компресори, двигуни та інші). Швидкі зміни у споживанні електричної енергії цими навантаженнями призводять до відповідних коливань величини напруги, особливо коли електрична система не має відповідної встановленої потужності або характеризується високим значенням загального опору. З огляду на це, величину та частоту коливань напруги можна змоделювати за допомогою контролю величин навантаження та опору системи. Коливання напруги через зміну навантаження можна визначити за залежністю [6]:

$$\Delta U = \frac{I_H \cdot Z_M}{U_{ном}} \cdot 100\% \quad (1.17)$$

де I_H – величина струму через навантаження, А,

Z_M – загальний опір системи електроживлення, Ом.

Ключовий прояв коливань напруги характеризується генерацією мерехтіння (флікера), що визначає відчутні коливання інтенсивності світлового випромінювання штучними освітлювальними приладами. Флікер є особливо небезпечним у середовищах, де потрібна точна зорова робота (наприклад, медичні установи, промислові процеси з використанням фоточутливих датчиків та інші). Флікер може бути кількісно оцінений за допомогою індексу інтенсивності флікера, який визначає сприйняття людиною мерехтіння світла, що викликане коливанням напруги [6]:

$$P_t = k \cdot f \cdot \left(\frac{\Delta U}{U_{ном}} \right)^2 \quad (1.18)$$

де k – коефіцієнт, що залежить від типу джерела світла та чутливості людського ока до мерехтіння.

Індекс мерехтіння забезпечує стандартизований метод оцінки впливу коливань напруги на зорове сприйняття – його вищі значення вказують на сильніше мерехтіння, яке може бути незручним або навіть шкідливим у певних середовищах, і державні стандарти визначають прийнятні рівні інтенсивності мерехтіння.

Отже, флікер та коливання напруги є серйозними проблемами при забезпеченні якості електричної енергії, які можуть негативно вплинути на роботу електричних підстанцій та підключеного до них обладнання. Ці явища в першу чергу викликані великими коливаннями навантажень, такими як дугові печі та двигуни з високими пусковими струмами. Вплив мерехтіння є особливо сильним у системах освітлення, де воно може викликати дискомфорт і вплинути на продуктивність праці. Коливання напруги призводять до збільшення втрат, перегріву та зниження ефективності в трансформаторах, збірних шинах і батареях конденсаторів.

2 ОГЛЯД ПИТАНЬ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, ЩО ВПЛИВАЮТЬ НА РОБОТУ ОБЛАДНАННЯ ПІДСТАНЦІЙ

2.1 Загальні проблеми забезпечення якості електричної енергії

Проблеми якості електричної енергії стають все більш важливими в сучасних системах електропостачання через зростаючу складність електромереж і широку інтеграцію нелінійних навантажень і розподілених джерел генерації. Обладнання електричних підстанцій є особливо чутливим до впливу низької якості електричної енергії. Ці проблеми можуть проявлятися в різних формах: гармонійні спотворення, відхилення напруги, асиметрія та коливання напруги. Кожне з цих порушень впливає на продуктивність, надійність і термін служби обладнання підстанції, часто приводячи до його неефективної роботи, збільшення експлуатаційних витрат і виходу обладнання з ладу, якщо не керувати цим процесом належним чином [7].

Основною функцією електричної підстанції є сприяння ефективній передачі електроенергії між джерелами виробництва та кінцевими споживачами, підтримка відповідних рівнів напруги й забезпечення стабільної роботи навантажень. Відхилення умов експлуатації, які спричинені порушеннями якості електричної енергії, здатні серйозно погіршити функціонування обладнання підстанцій. У разі погіршення якості електричної енергії обладнання піддається аномальним електричним навантаженням, що може прискорити їх зношення та знизити ефективність його роботи [8].

Однією з найбільш проблем, пов'язаних з порушенням якості електричної енергії, є гармонічні спотворення. Гармонійні струми та напруги, що створюються нелінійними споживачами (наприклад, випрямлячі, інвертори та інші силові електронні пристрої), спотворюють ідеальну синусоїдальну форму електричних сигналів. Це спотворення

призводить до додаткових втрат у компонентах підстанцій, насамперед через посилене нагрівання та генерацію вихрових струмів, здатні порушити роботу захисних пристроїв – сукупний ефект гармонійних спотворень може значно погіршити роботу всієї підстанції [9].

Відхилення величини напруги, як її перевищення, так і її зниження, є одним з важливих аспектів порушення якості електричної енергії. Перевищення величини напруги може призвести до руйнування ізоляції, надмірного нагрівання та передчасного виходу з ладу трансформаторів, автоматичних вимикачів та конденсаторів. Низьке значення напруги призводить до збільшення величини струму для підтримки того самого значення вихідної потужності, що призводить до перенавантаження провідників та трансформаторів підстанції. Обидва типи відхилень напруги можуть скоротити термін служби обладнання, збільшити втрати та призвести до неефективності роботи обладнання [9].

Асиметрія напруги характеризується тим, що величини напруги або фазові кути в трифазній системі є незбалансованими, що становить суттєві ризики для функціонування електричного обладнання підстанції. Трансформатори та інші пристрої, спроектовано для роботи у збалансованій трифазній системі. При виникненні несиметрії такі пристрої навантажуються нерівномірно, що призводить до надмірного нагрівання та механічних навантажень на окремі частини обладнання. Асиметрія напруг впливає на роботу захисних пристроїв, знижуючи точність їх роботи та викликаючи потенційні небезпеки та неадекватність захисту в разі виникнення несправності [9].

Коливання напруги та мерехтіння, що викликані швидкими та повторними змінами величини напруги мережі, можуть суттєво впливати на роботу обладнання підстанції, збільшуючи механічні та термічні навантаження на їх компоненти [9].

Таким чином, порушення якості електричної енергії пояснюється гармонічними спотвореннями, відхиленням напруги, асиметрією та

флікером, чим створюються умови для ненадійної роботи електричних підстанцій. Чутливе обладнання підстанцій вимагає забезпечення ретельного моніторингу, впровадження надійних методів проектування, що забезпечує довгострокову стабільність та ефективність функціонування енергетичних систем.

2.2 Вплив порушення якості електропостачання на обладнання підстанції

Якість електричної енергії має суттєвий вплив на надійність та ефективність роботи електричних підстанцій. Гармонійні спотворення, відхилення напруги та коливання напруги не тільки погіршують продуктивність роботи обладнання підстанції та створюють додакові механічні, термічні та електричні навантаження на ключові компоненти підстанцій. Розуміння конкретних впливів цих явищ на обладнання має вирішальне значення для розробки ефективних стратегій пом'якшення та покращення загальних принципів роботи електричних підстанцій [10].

Гармоніки викликають значні втрати в трансформаторах через вихрові струми та гістерезис, які посилюються зі збільшенням частоти напруги. В осерді трансформатора втрати на вихрові струми можна визначити за залежністю [10]:

$$P_{\text{вт.ос.}} = k_{\text{ос}} \cdot B^2 \cdot f^2 \cdot V, \quad (2.1)$$

де $k_{\text{ос}}$ – конструктивний коефіцієнт, що залежить від матеріалу осердя,

B – величина магнітної індукції, Тл,

f_n – частота n -ї гармоніки, Гц,

V – об'ємний розмір осердя, м³.

Зі збільшенням частоти кількості гармонік втрати на вихрові струми суттєво зростають, що призводить до виникнення локальних перегрівів та збільшення теплового навантаження на ізоляцію. Крім того, високі частоти гармонік збільшують струми намагнічування трансформатора, що за певних умов призводить до перенасичення осердя, що може бути схарактеризовано зміною магнітного потоку від n -ї гармоніки, Вб [10]:

$$\Phi_n = \frac{U_n}{2\pi \cdot f_n \cdot N}, \quad (2.2)$$

де U_n – напруга n -ї гармоніки частотою f_n , В,

N – кількість витків в обмотці трансформатора, шт.

Загальний магнітний потік трансформатора створений вищими гармоніками, призводить до додаткових струмів намагнічування, наближаючи осердя до насичення, що значно збільшує втрати в осерді. Коли осердя переходить у стан насичення, його здатність ефективно передавати енергію знижується, що призводить до надмірного нагрівання та до потенційного руйнування ізоляції. Крім того, гармонічні спотворення призводять до нерівномірного розподілу потоку в осерді трансформатора, що ще більше погіршує тепловий стан, що прискорює старіння ізоляційного матеріалу та може призвести до аварійних станів та виходу трансформатора з ладу.

Струмопровідні шини слугують основними шляхами для розподілу електричної енергії на підстанціях також піддаються впливу гармонійних спотворень. Гармонійні струми «концентруються» на поверхні шин завдяки «скін-ефекту», збільшуючи їх опір. Скін-ефект може бути схарактеризований глибиною, що визначає проникнення струму [10]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\mu \cdot \omega}}, \quad (2.3)$$

де ρ – питомий опір матеріалу шин, Ом/м,

μ – магнітна проникність матеріалу шин, Гн/м,

ω – кутова частота, рад/с.

$$\omega = 2\pi \cdot f. \quad (2.4)$$

Зі збільшенням частоти глибина величина скін-ефекту зменшується, змушуючи більшому потоку струму протікати біля поверхні провідника, що призводить до збільшення значення ефективного опору. Підвищення значення ефективного опору на гармонічних частотах призводить до збільшення потужності розсіювання [10]:

$$P_{\text{роз.ш.}} = I_n^2 \cdot R_{\text{еф}}(f_n), \quad (2.5)$$

де I_n – струм n-ї гармоніки, А,

$R_{\text{еф}}(f_n)$ – значення ефективного опору на частоті n-ї гармоніки, Ом.

Надмірні потужності розсіювання призводить до періодичного теплового розширення та звуження шин, що з часом може призвести до механічної втоми. Крім того, гармонійні струми викликають появу електромеханічних сили на шинах, що посилює вібрації та збільшуючи ризик руйнування механічних конструкцій та з'єднань.

Конденсаторні батареї, що застосовуються на електричних підстанціях, можуть увійти у резонанс з гармоніками на певних частотах. Конденсатори природним чином демонструють зменшення загального опору зі збільшенням частоти, що робить їх схильними до поглинання гармонійних струмів [10]:

$$Z_c = \frac{1}{j \cdot \omega_n \cdot C} = \frac{1}{j \cdot 2\pi \cdot f_n \cdot C}, \quad (2.6)$$

де C – ємність конденсатора(ів), Φ .

На гармоніках вищих частот опір конденсатора суттєво зменшується, що дозволяє гармонійним струмам протікати через конденсаторну батарею, що у свою чергу призводить до високих значень потужності розсіювання в конденсаторах, збільшуючи ризик пробою діелектрика та теплового перевантаження. Більш серйозні проблеми спостерігаються у тих режимах, коли індуктивний реактивний опір системи та ємнісний реактивний опір батареї конденсаторів резонують на певній частоті гармонік [10]:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{LC}}, \quad (2.7)$$

де L – індуктивність системи, Гн.

Під час резонансу загальний опір електричного ланцюга стає дуже високим, що призводить до надмірних коливань напруги та струму на резонансній частоті. Це явище може викликати появу надвисоких значень циркулюючих струмів через конденсаторну батарею, що призведе до їх перевантаження, надлишкового нагрівання та можливого вибуху.

Автоматичні вимикачі підстанцій калібруються на основі середньоквадратичного значення струму, а гармонійні спотворення збільшують середньоквадратичне значення понад це розрахункове значення. Результуюче значення середньоквадратичного струму з урахуванням гармонік може бути визначений за залежністю [10]:

$$I_{\text{ск}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}, \quad (2.8)$$

де I_1 – значення струму на основній частоті, А,

Зі збільшенням вмісту гармонік зростає середньоквадратичне значення, що може призвести до перевантаження вимикача та передчасного його спрацьовування. Перенапруги, що спричинені наявністю гармонік, збільшують величину напруженості електричного поля в діелектричному середовищі вимикача, що створює ризик пробою діелектрика та виникнення дуги на контактах. Під час перемикань гармонійні спотворення можуть призвести до повторного запалювання електричної дуги через недостатнє відновлення діелектричного середовища. Ці процеси також можуть значно погіршити стан контактів, призводячи до їх швидшого зношування та скорочення терміну служби вимикача. Гармонічні компоненти вводять вищі частоти до синусоїдної форми хвилі струму, викликаючи додаткові коливання магнітного потоку в осердях трансформаторів. Це призводить до збільшення втрат на вихрові струми та втрат на гістерезис. Загальні втрати в осерді трансформатора з урахуванням гармонік, можна описати модифікованим рівнянням [10]:

$$P_{\text{ос.}} = k_{\text{ос.}} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} B_n^{\alpha} \cdot f_n^{\beta}, \quad (2.9)$$

де $k_{\text{ос.}}$ – коефіцієнт, що характеризує властивості матеріалу осердя,

B_n – величина магнітної індукції від n -ї гармоніки, Тл,

α, β – емпіричні коефіцієнти, що залежать від конструкції осердя.

Зміни магнітного потоку, що викликані гармоніками призводять до частой змiни напрямку магнітних доменів у матеріалу, тим самим збільшуючи втрати на гістерезис. Втрати на вихрові струми залежить частоти та швидко зростають, коли у формі сигналу з'являються гармоніки вищого порядку. Загальним ефектом є локальне нагрівання осердя

трансформатора. Насичення осердя через гармонійні спотворення становить значну проблему для нормальної роботи трансформаторів, оскільки осердя трансформатора розроблено для роботи в певному діапазоні щільності магнітного потоку. Коли відбувається насичення, здатність осердя ефективно передавати енергію зменшується, що призводить до нелінійної поведінки трансформатора та різкого зростання втрат.

Гармоніки також мають вплив на величину втрат в обмотках трансформаторів. Окрім збільшення втрат міді, гармоніки викликають зміщення та скін-ефекти, що здатні збільшити розсіювання енергії. Ефекти зміщення є особливо проблематичним при наявності високочастотних гармонік, коли вони накопичуються в одній з обмоток, і зменшуючи ефективну площу поперечного перерізу для проведення струму. Результуюче збільшення опору обмотки при наявності гармонік можуть бути схарактеризовані рівнянням [10]:

$$R_n = R_1 \cdot \left(1 + k_r \cdot \frac{I_n}{I_1}\right), \quad (2.10)$$

де R_1 – опір обмотки на основній частоті, Ом,

k_r – коефіцієнт, що враховує геометрію та конструкцію обмотки,

I_n – струм n -ї гармоніки, А.

Збільшення опору призводить до збільшення втрат та викликаючи надмірне нагрівання обмотки трансформатора. Наявність скін-ефекту ще більше ускладнює ситуацію, призводячи до концентрації гармонічних струмів біля поверхні провідників, що підвищує значення ефективного опору на вищих частотах і призводить до нерівномірного розподілу струму в обмотках.

Системи заземлення призначені для забезпечення низькоомного шляху для струмів та вирівнювання рівнів напруги шляхом забезпечення

опорного потенціалу по відношенню до «землі». Наявність гармонік змінює форми хвиль струму та напруги від синусоїдної форми, що ускладнює роботу системи заземлення. Вплив гармонік на системи заземлення проявляється у підвищенні величини опору, підвищених втратах і неефективному розсіюванні струмів, що впливає на безпеку та надійність роботи електричних систем. Опір системи заземлення проектується за умови його мінімального значення на основній частоті, однак гармонічні компоненти змінюють цей опір. Загальне значення опору системи заземлення можна представити як комбінацію активних та індуктивних компонентів, на кожен з яких впливають гармоніки [10]:

$$Z_n = \sqrt{R^2 + (n \cdot X)^2}, \quad (2.11)$$

де n – номер гармоніки.

Зазначений ефект перешкоджає ефективному розсіюванню гармонійних струмів «на землю», потенційно призводячи до підвищення потенціалів напруги в системі заземлення.

Активна складова опору заземлення, що залежить від питомого опору ґрунту та геометрії заземлюючих електродів, піддаються впливу гармонійних струмів, які викликають скін-ефект, коли струм має тенденцію протікати по поверхні провідників, зменшуючи ефективну площу поперечного перерізу, доступну для протікання струму, і збільшуючи опір при наявності вищих гармонік. Підвищення опору обмежує здатність системи заземлення ефективно розсіювати струми. Індуктивний реактивний опір заземлювача залежить від частоти та зростає при наявності гармонік. Гармонійні струми сприяють додатковим втратам потужності, збільшуючи виробку теплової енергії. Надлишкове нагрівання компонентів системи заземлення погіршує контакт між заземлюючими провідниками та ґрунтом навколо них [10].

Гармонічні струми можуть створювати додаткові електромагнітні поля, які індукують «паразитні» струми в сусідніх провідниках. Ці струми можуть циркулювати всередині системи заземлення або навіть переходити в інші частини електричної системи, що призводить до виникнення небажаних перешкод.

Індуковану напругу в сусідніх провідниках через наявність гармонійного струму, що протікає через заземлювач, можна характеризувати залежністю [10]:

$$U_{\text{інд.}} = I_n \cdot \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \ln \left(\frac{D}{d} \right), \quad (2.12)$$

де μ_0 – електрична проникність середовища/грунту, Гн/м,

D – відстань між провідниками/заземлюючого електрода, м,

d – діаметр провідників/заземлюючого електрода, м.

Зазначені індуковані напруги заважають правильній роботі чутливого обладнання/системи заземлення.

У системах зв'язку гармонічні струми створюють електромагнітні перешкоди, які впливають на якість передачі даних провідним або безпроводним шляхом. Гармонійні електромагнітні перешкоди створюють шум у широкому діапазоні частот і різницю потенціалів напруги, викликану наявністю гармонійних струмів, що протікають через загальний опір. Результуючі шуми здатні спотворювати сигнали систем зв'язку, що призводить до погіршення співвідношення сигнал/шум. Низьке значення цього співвідношення порушує цілісність даних, збільшуючи ймовірність помилок передачі, зниження швидкості передачі даних, а в серйозних випадках – до припинення факту зв'язку. Частоти гармонійних коливань, що є близькими до частот сигналів зв'язку є особливо небезпечними, оскільки перешкоди узгоджуються з робочою смугою пропускання комунікаційного обладнання. Гармоніки також індукують струми в

сусідніх провідниках через взаємну індуктивність, викликаючи перехресні перешкоди між лініями зв'язку. Перехресні перешкоди погіршують якість зв'язку, вводячи «паразитні» сигнали в лінію передачі даних, що призводить до спотворення сигналу та зниження ефективності передачі даних. Системи зв'язку, на які впливають перехресні перешкоди, вимагають додаткового екранування або фільтрації, щоб обмежити вплив гармонійних частот [6].

У системах радіозв'язку гармоніки заважають як передачі так і прийому сигналів. Потужність перешкод, що створюється гармонійними струмами залежить від проникності простору та відстані від джерела перешкод. Дана потужність викликає спотворення сигналу, зменшуючи чіткість і дальність радіозв'язку. Гармоніки від силових ліній електропередач, розташованих поблизу радіоантен, створюють значні електромагнітні перешкоди, що призводить до статички та втрати сигналу в радіосистемах.

Наявність гармонік впливає на точність роботи вимірювальних приладів, особливо тих, що використовуються для аналізу та моніторингу якості електричної енергії. Робота вимірювальних пристроїв спирається на припущення, що напруга та струм мають синусоїдальну форму. Однією з основних проблем є невірне обчислення середньоквадратичних значень величин за наявності гармонік. Неточність розрахунку середньоквадратичних значень може призвести до невірної оцінки споживання електричної енергії. Наявні неточності впливають на коректність «виставлення» рахунків, алгоритми управління енергією та оцінка якості електричної енергії, що може призвести до додаткових фінансових втрат і невірного аналізу стану енергосистеми [6].

Гармонійні спотворення суттєво позначаються на фактичному значенні коефіцієнта потужності [11]:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}, \quad (2.13)$$

де P – активна потужність, Вт,

Q – реактивна потужність, ВАр,

D – потужність, викликана гармонійними спотвореннями, ВА.

Отже, гармонійні спотворення знижують значення коефіцієнта потужності нижче очікуваного рівня і потребує додаткових заходів з корекції коефіцієнта потужності.

Гармонічні струми також впливають на роботу трансформаторів струму (ТС), які використовуються в вимірювальних і захисних пристроях, і розроблені для роботи в певному діапазоні частот. Гармоніки створюють ефекти насичення в осердях ТС, що призводить до похибок вимірювання. При високих гармонічних частотах щільність магнітного потоку в осердях ТС перевищує межу насичення, викликаючи нелінійну поведінку та невірні значення вимірюваних струмів [6].

Точне вимірювання значення фазового кута має важливе значення для аналізу якості електричної енергії та роботи захисних реле. Наявні гармоніки викликають фазовий зсув між формами хвилі напруги та струму. Таке викривлення фазового кута призводить до помилок у розрахунках коефіцієнта потужності, реактивної потужності та інших показників якості електричної енергії. Захисні реле, які покладаються на точні вимірювання значення фазового кута для виявлення несправностей, можуть не спрацювати через викривлення цього значення при вимірюванні, що призводить до затримки виявлення несправності або помилкового відключення. У цифрових вимірювальних приладах для їх функціонування використовуються аналого-цифрові перетворювачі (АЦП), що здійснюють вибірку та обробку відповідних сигналів. Гармоніки викликають накладення згенерованих спектрів в АЦП, де високочастотні компоненти можуть невірно інтерпретуються як нижчі частоти, що призводить до

неправильного представлення сигналу. Зазначені накладення спотворюють форму сигналу вибірки, що призводить до помилкових вимірювань у цифрових пристроях. Щоб мінімізувати вплив накладень, у цифрових вимірювальних приладах необхідно застосування додаткових фільтрів для згладжування, що збільшує складність системи та її вартість [6].

Гармонійні спотворення, відхилення напруги та несинусоїдальні форми сигналів створюють серйозні навантаження на обладнання підстанції, значно знижуючи його ефективність і термін служби. Трансформатори страждають від підвищених втрат на вихрові струми та насичення осердя, тоді як шини та батареї конденсаторів сприймають додаткові термічні та механічні навантаження. Відхилення напруги ще більше посилюють ці проблеми, створюючи додаткові електричні та теплові навантаження на обладнання. Ці складні взаємодії вимагають впровадження складних засобів захисту, фільтрації та регулювання для забезпечення продуктивності та довговічності компонентів підстанції.

Гармонійні спотворення є однією з найбільш серйозних проблем, з якими стикаються сучасне обладнання електричних підстанцій через те, що нелінійні навантаження стають все більш поширеними в даних енергосистемах. Нелінійні пристрої вводять у мережу гармонійні складові вищого порядку, що призводить до викривлення синусоїдальної форми струмів і напруг. Зазначені гармоніки викликають низку проблем в роботі обладнання підстанцій, починаючи від підвищених втрат енергії та термічного навантаження до механічного зношення та передчасного виходу його з ладу. Негативні наслідки гармонійних спотворень струмів і напруг є більш серйозними, ніж просте збільшення втрат, оскільки вони ініціюють складну взаємодію між електричними, тепловими та механічними явищами.

Відхилення напруги, як її перевищення, так і її зниження, збільшують значення діелектричної напруги на трансформаторах, вимикачах і шинах. Зниження напруги, хоч і має менш руйнівні наслідки, призводять до

зниження ефективності роботи обладнання. Коливання напруги відносяться до короткочасних коливань величини напруги, які часто викликані швидкими змінами навантаження, операціями перемикавання або несправностями в системі. Мерехтіння, явище, тісно пов'язане з коливаннями напруги, є видимою зміною інтенсивності освітлення, спричиненою цими коливаннями. Як коливання напруги, так і мерехтіння можуть призвести до неефективності роботи, перегріву та механічної деградації обладнання підстанції. Розуміння кількісного та якісного впливу цих збурень і вирішення викликів, які вони створюють, має вирішальне значення для підтримки надійності роботи електричних підстанцій [12].

Коливання напруги зазвичай характеризуються відхиленням від номінальної напруги протягом короткого періоду часу, тоді як мерехтіння є наслідковою проблемою, спричиненою повторними змінами напруги з часом. Коли коливання напруги перевищують допустимі межі, вони призводять до значних проблем в роботі обладнання підстанції. Однією з основних проблем, пов'язаних із коливаннями напруги, є їх вплив на трансформатори. Трансформатори розроблені для роботи в певному діапазоні напруг, і будь-яке відхилення від цього діапазону може призвести до збільшення втрат в осерді, втрат в обмотці та зниження ефективності. На втрати в осерді трансформатора, що включають втрати на вихрові струми та втрати на гістерезис, впливають коливання щільності магнітної індукції, яка змінюється залежно від прикладеної напруги. Загальні втрати в осерді через коливання напруги можна схарактеризувати залежністю [6]:

$$P_{\text{ос.}} = P_{\text{вих.ст.}} + P_{\text{гіст.}} = k_{\text{ос.1}} \cdot f^2 \cdot B^2 + k_{\text{ос.2}} \cdot B^\alpha, \quad (2.14)$$

де $P_{\text{вих.ст.}}$ – втрати на вихрові струми, Вт,

$P_{\text{гіст.}}$ – втрати на гістерезис, Вт,

$k_{\text{ос. i}}$ – коефіцієнти, значення яких залежить від матеріалу осердя,

B – величина магнітної індукції, яка пропорційна величині напруги, Тл,

α – коефіцієнт, що характеризує магнітні властивості матеріалу осердя.

У разі коливання напруги, магнітний потік в осерді трансформатора може суттєво змінюватися, що призводить до його надмірного нагрівання через збільшення величини втрат. Особливо чутливим до зміни напруги є компонент втрат на гістерезис – в разі різкого та швидкоповторюваного коливання напруги можуть виникнути локальні Високотемпературні області в осерді трансформатора. З часом це може призвести до термічних напруг та погіршення стану ізоляції, що зменшує термін служби трансформатора. Швидкозмінні коливання напруги можуть призвести до надмірного насичення осердя трансформатора, особливо під час високих навантажень і перевантажень трансформатора [6].

При зменшенні величини напруги, струм повинен збільшуватися, щоб забезпечити ту саму потужність навантаження, що призводить до вищих втрат мідних провідниках, які проявляються у вигляді нагрівання обмоток, що прискорює старіння ізоляції та підвищує ризик термічних пробойів, перегріву, деформації або навіть повного виходу з ладу обмоток трансформатора.

Мерехтіння (флікер), що є результатом високочастотних коливань напруги, в першу чергу впливає на обладнання, чутливе до коливань напруги, наприклад батареї конденсаторів і пристрої захисту. Хоча флікер зазвичай пов'язують з приладами і системами освітлення, воно має прямі негативні наслідки для обладнання підстанції. Коливання напруги, що викликають мерехтіння, також спричиняють часті зміни вихідної реактивної потужності батарей конденсаторів. Конденсаторні батареї призначені для забезпечення компенсації реактивної потужності, і їх продуктивність сильно залежить від стабільності напруги. Коли напруга

коливається з високою частотою, вихідна реактивна потужність батареї конденсаторів стає нестабільною. У періоди провалів напруги батарея конденсаторів забезпечує меншу реактивну потужність, що знижує її ефективність у регулюванні напруги та підтримці якості електричної енергії. І навпаки, під час стрибків напруги батарея конденсаторів може надлишково компенсувати реактивну потужність, що призводить до перенапруг, які можуть пошкодити конденсатори. Повторний вплив коливань напруги прискорює знос батарей конденсаторів, що призводить до передчасного виходу з ладу через діелектричний пробій або перегрів. Іншою серйозною проблемою, пов'язаною з коливаннями напруги, є механічне навантаження, яке вони створюють на шинах підстанції. Шинопроводи призначені для передачі великих струмів між різними ділянками підстанції, і коливання напруги викликають зміни струму, що протікає через них. Під час провалів напруги струм в шині збільшується, що призводить до вищих втрат потужності та локального нагрівання. Повторне нагрівання та охолодження шини внаслідок коливань напруги може спричинити термічні цикли, які з часом послаблюють структурну цілісність шин. Це теплове розширення та звуження може призвести до розвитку тріщин у збірних шинах та/або ослаблення з'єднань, що потенційно може призвести до виникнення несправностей навіть під час нормальної роботи [6].

Параметри якості електричної енергії, такі як гармонійні коливання, коливання напруги, несиметрія напруги та флікер, значно впливають на стабільність і надійність роботи обладнання підстанцій. Гармонійні коливання спричиняють додаткові теплові навантаження на елементи системи, що призводить до їхнього прискореного зносу. Коливання та несиметрія напруги викликають небажані перехідні процеси, які знижують ефективність роботи обладнання. Застосування технологій для корекції цих параметрів є важливим для забезпечення стабільного енергопостачання та продовження терміну служби обладнання.

2.3 Огляд наукових статей по темі кваліфікаційної роботи

У науковій статті [13] представлено дослідження щодо вимірювання та аналізу гармонійних спотворень у системах розподілу електроенергії та зосереджено на нових показниках для моніторингу і прогнозування гармонійних спотворень. Основною метою є усунення обмежень існуючих методів вимірювання, яким часто бракує вичерпних даних через системні обмеження. Щоб досягти цього, дослідження вводять два ключових параметри: загальне номінальне спотворення (TRD) для вимірювань струму та еквівалентний гармонічний опір (Z_{eq}) для напруги. Дані параметри спрямовані на намагання стандартизації вимірювань гармонік і покращення характеристик гармонійної поведінки мережі. Дослідження підкреслює вплив нелінійних навантажень споживачів на спотворення напруги, припускаючи, що TRD може ефективно відображати загальне спотворення струму в різних навантаженнях. Цей індекс у поєднанні із значенням Z_{eq} дає змогу чіткіше зрозуміти вплив гармонік на величину напруги, створюючи основу для прогнозування майбутніх спотворень. Застосовуючи розрахунки по методу найменших квадратів і кореляційний аналіз, дослідники доводять, що ці показники пропонують надійну основу для можливості здійснення моніторингу та екстраполяції гармонійної поведінки в мережі, які змінюються з часом. Отримані дані свідчать про те, що впровадження цих параметрів до стандартів якості електроенергії може покращити точність прогнозування виникнення гармонік, забезпечуючи більш стабільні та надійні системи розподілу електроенергії. Дані положення були підтверджені за допомогою масштабних вимірювань гармонік на місцях розподілу електроенергії в реальній електричній мережі, що підкреслює практичну застосовність цих запропонованих досліджень.

У науковій статті [14] представлено новий алгебраїчний метод швидкої параметричної оцінки сигналів в системах електроенергії з кількома гармоніками. Основна мета дослідження – забезпечити швидку та точну оцінку параметрів амплітуди, частоти та фази гармонік, не покладаючись на похідні сигналу чи початкові умови, які часто недоступні в реальному часі. Запропонований підхід використовує інтегральні показники у часовій області для складання алгебраїчних залежностей для оцінки параметрів. Даний підхід відрізняється від традиційних методів, що розуміють використання складних алгоритмів (наприклад, таких як перетворення Фур'є). Зазначені інтегральні параметри забезпечують одночасне та швидке обчислення гармонійних параметрів, таким чином збільшуючи час відгуку порівняно зі звичайними рекурсивними та асимптотичними методами. Метою дослідження було створення гнучкого інструмента оцінювання, який здатен обробляти довільні непарні гармонічні частоти, які все частіше зустрічаються в енергетичних системах через широке використання силової електроніки та нелінійних пристроїв. Результати моделювання демонструють ефективність запропонованого методу завдяки можливості швидкої оцінки кількох гармонік та здійснення моніторингу в реальному часі та можливостей адаптивного керування в електричних системах. Результати роботи показують високу точність при розрахунку змінних частотних компонентів і особливу користь для виявлення тимчасових несправностей і оцінки якості електричної енергії.

У науковій статті [15] розглядаються теоретичні основи та практичні наслідки аналізу реактивної потужності в несинусоїдальних електричних системах, зокрема оцінюються переваги та обмеження підходів у часовій та частотній областях. Основною метою дослідження було визначення того, який підхід найкраще сприяє точній оцінці передачі енергії та покращенню значення ефективного коефіцієнта потужності (PF) при несинусоїдальних формах напруги/струму. У дослідженні доводиться положення, що хоча підхід у часовій області має переваги від застосування

простіших інструментів, він не може пояснити основні механізми неефективності використання енергії та складності оптимізації значення PF. Для усунення зазначених обмежень у частотній області, у дослідженні представлено новий метод декомпозиції для несинусоїдного струму, який дозволяє ізолювати активні, розсіяні та реактивні компоненти струму, тим самим покращуючи інтерпретацію заходів по ефективності передачі електричної енергії. Зазначене розкладання на складові забезпечує більш ефективну компенсацію PF за допомогою вдосконалених методів керування реактивною потужністю, особливо за наявності гармонійних струмів. У дослідженні стверджується, що здійснення досліджень у частотній області не тільки забезпечує точнішу структуру для аналізу реактивної потужності, але також визначає потенціал для покращення значення PF, маючи переваги над методами у часовій області. У роботі підкреслюється необхідність вдосконалення метрологічного дослідження несинусоїдних систем і пропонуються подальші способи уточнених методів компенсації для практичного застосування в енергосистемах.

У науковій статті [16] досліджується вплив нелінійних спотворень у формах сигналів напруги та струму на точність приладів обліку споживання електричної енергії, особливо в умовах нелінійного навантаження. Основна мета дослідження полягає в тому, щоб дослідити, як різні гармоніки впливають на точність показань лічильника, особливо в промислових і житлових умовах з пристроями, які генерують гармонічні спотворення, такими як світлодіодне освітлення, перетворювачі та дугові печі. Дослідження підкреслює, що дані спотворення здатні спричинити значні похибки вимірювання, які часто перевищують прийняті метрологічні межі. Для оцінки були оглянуті як індукційні, так і електронні лічильники, – було виявлено, що індукційні лічильники є менш чутливими до певних гармонік, особливо кратних трьом, але схильні до помилок на певних непарних гармоніках, таких як 5-та та 7-ма. Експерименти з лічильниками показали, що частотні характеристики

сильно відрізняються для різних типів пристроїв, причому похибки особливо виражені на частотах вищих гармонік. У дослідженні робиться висновок про те, що хоча електронні лічильники пропонують більш стабільні показання, вони характеризуються наявністю неточностей під дією значних гармонічних впливів. Дані висновки свідчать про потребу в удосконаленні технологій вимірювань, які здатні врахувати гармонійні ефекти.

У науковій статті [17] розглянуто проблеми вимірювання якості електричної енергії за наявності несинусоїдних умов під впливом нелінійних пристроїв, які вносять значні спотворення форми сигналу. Поширення силових напівпровідникових пристроїв і перетворювачів збільшило кількість нелінійних навантажень, які, у свою чергу, спотворюють синусоїдальний характер електричних сигналів. Це спотворення впливає на ключові величини, такі як повна потужність, реактивна потужність і коефіцієнт потужності, що часто призводить до неправильної інтерпретації стану енергосистем. У роботі здійснено критичний огляд визначення повної та реактивної потужності як в однофазних, так і в трифазних системах, оцінюється їх ефективність за різних умов, включаючи синусоїдальні, несинусоїдні, збалансовані та незбалансовані стани. Для вирішення наявних проблем пропонується методологія, заснована на теорії миттєвої потужності, яка дозволить забезпечити більш точні вимірювання показників якості електричної енергії. Результати показали, що даний підхід є особливо корисним за несинусоїдальних умов роботи, пропонуючи надійні вимірювання навіть при спотвореннях сигналів та при наявності дисбалансу навантаження. Дана робота суттєво сприяє підвищенню якості моніторингу електричної енергії, що може запропонувати підходи для підвищення стабільності та ефективності роботи електричних мереж.

У науковій статті [18] представлено стандартні визначення та методології для вимірювання параметрів електропостачання в системах,

що працюють у синусоїдальних, несинусоїдальних, збалансованих або незбалансованих умовах. Встановлення та застосування стандартів має важливе значення для вирішення проблем, пов'язаних із наявністю нелінійних навантажень і які спотворюють параметри, що характеризують величину потужності. Основною метою роботи був пошук способів для здійснення точних вимірювань. У роботі наголошується на необхідності оновлення фундаментальних способів визначення потужності. Підкреслено необхідність використання передових математичних моделей для точного вимірювання електричних величин в умовах роботи з несинусоїдальними напругами та струмами. Перегляд стандартів допоможуть не тільки покращити оцінку якості електричної енергії, але й виявити значні гармонічні спотворення. Розроблений в роботі стандарт IEEE Std 1459-2010 пропонує алгоритми для розробки вдосконалених вимірювальних приладів.

У науковій статті [19] досліджуються способи оцінки гармонік при наявності нелінійних навантажень, зокрема шляхом здійснення моделювання для оцінки наявних гармонік. Шляхом моделювання роботи перетворювачів була здійснена кількісна оцінка гармонійних спотворень і оцінка методів їх зменшення при використанні фільтрів електромагнітних перешкод (EMI) і схем корекції коефіцієнта потужності (PF). За допомогою симуляцій у програмному середовищі Matlab-Simulink порівнюються гармоніки, що створюються шляхом реалізації різних моделей навантаження. Було показано, що моделі RC-навантажень із постійною потужністю реалізують генерацію гармонік перетворювачами з більшою точністю, ніж інші моделі. Результати досліджень показали, що фільтри електромагнітних перешкод несуттєво впливають на рівні гармонік струму, але суттєво спотворюють форму напруги через взаємодію з опором системи. Реалізація методів корекції коефіцієнта потужності значно зменшує гармоніки як напруги, так і струму, наближаючи його значення до нормативних, хоча деякі гармоніки все ще можуть

перевищувати певні порогові значення. У дослідженні робиться висновок про те, що дослідження складних моделей перетворювачів дозволяють здійснити точний гармонійний аналіз в системах з нелінійними навантаженнями. Точні моделювання гармонійних станів дозволяє ефективно керувати якістю електричної енергії в сучасних електричних системах.

У науковій статті [20] досліджується вплив гармонік на старіння трансформатора при наявності у електричній мережі нелінійних навантажень, що прискорює деградацію елементів трансформатора через збільшення втрат потужності та їх підвищену температуру. Основною метою роботи було моделювання теплових впливів від гармонік на трансформатори під час різних циклів навантаження, що змінюються в часі, з урахуванням температури навколишнього середовища для передбачення областей збільшення температури в обмотках трансформатора. Локальне підвищення температури призводить до погіршення стану ізоляції, що є вирішальним для оцінки остаточного терміну служби трансформатора. У дослідженні була створена теплова модель трансформатора, яка реалізує різноманітні втрати: на вихрові струми, «паразитні» перетікання та від впливу гармонік струму. Модель показала, що гармоніки, особливо на високих частотах, значно підвищують як температуру верхньої частини мастила, так і температуру обмоток. У дослідженні робиться висновок, що точне прогнозування теплового стану трансформаторів у мережах, що містять значну кількість гармонік, має важливе значення для їх ефективної експлуатації.

У науковій статті [21] було розглянуто причини, наслідки та способи вирішення проблеми гармонійних спотворень в системах електропостачання, зокрема щодо відповідності міжнародним стандартам якості електричної енергії. Дослідження було спрямоване на вирішення зростаючої проблеми, пов'язаної з широким розповсюдженням нелінійних навантажень у системах споживання, і які генерують суттєву кількість

гармонік, з одночасним погіршенням якості електричної енергії. За допомогою моделювання у роботі були дослідженні численні пристрої, що містять силові напівпровідникові пристрої та схеми з пристроями для корекції коефіцієнта потужності. Дослідження показали, що коли певні гармоніки, як-от 5-та та 7-ма, резонують із опором мережі, гармонійні спотворення посилюються. Для пом'якшення негативних наслідків цих процесів у роботі пропонується підхід з використанням Smart Grid, які дозволяють здійснювати поточний контроль та обмінюватися даними про якість електричної енергії між користувачами. Впровадження «хмарних сховищ» та використання спеціальних з'єднань трансформаторів у «спільних» точках дозволяють суттєво знизити вплив гармонік на роботу мереж. У дослідженні рекомендується здійснення подальших експериментальних перевірок та розробка додаткових імітаційних моделей для інших типів порушень якості електричної енергії.

У науковій статті [22] розглянуто існуючі методи виявлення джерел гармонійних спотворень у системах розподілу електричної енергії, особливо актуальних, оскільки нелінійні навантаження та системи розподіленої генерації все більше порушують якість сигналів напруги та струму. Основна мета дослідження полягає в тому, щоб оцінити різні підходи до точного визначення джерел гармонік, і необхідних для покращення якості електричної енергії для належної відповідності електричним стандартам. Оскільки енергетичні компанії зазвичай обмежують свою відповідальність постачанням енергії на основній частоті, відповідальність за гармонічні перешкоди часто лягає на споживачів, вимагаючи чіткої ідентифікації джерел спотворень для забезпечення дотримання стандартів і ефективного застосування штрафних санкцій. Здійснений аналіз якості електропостачання охоплює кілька методів, у тому числі пряме вимірювання в точках підключення, статистичні підходи та гібридні методи, які оцінюють впливи на основі коливань якості електричної енергії за змінних умов навантаження. Пошук вирішення

проблем полягає у врахуванні складних взаємодій між різними джерелами спотворення форми сигналу та визначенням шляхів керування цими причинами. У роботі робиться висновок про те, що жоден метод не забезпечує повної точності в усіх сценаріях, підкреслюючи потребу у застосуванні вдосконалених гібридних методах для підвищення надійності виявлення та мінімізації економічного впливу проблем з якістю електричної енергії.

3 ОЦІНКА ВПЛИВУ ПОРУШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА РОБОТУ ОБЛАДНАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПІДСТАНЦІЇ

3.1 Оцінка і розрахунок параметрів порушення якості електричної енергії

Коливання напруги та гармонійні спотворення є двома найбільш значущими факторами, що впливають на роботу електрообладнання підстанцій. Ступінь зміни напруги вимірюється за допомогою коефіцієнта дисбалансу напруги (k_{UF}), а гармонічні спотворення кількісно визначаються за допомогою загального гармонійного спотворення (k_U). Ці перешкоди збільшують втрати в трансформаторах, шинах і автоматичних вимикачах і знижують ефективність обладнання, що призводить до перегріву і передчасного зносу.

Здійснюємо розрахунки якості електропостачання згідно вихідних даних.

Коефіцієнт дисбалансу напруги [23]:

$$k_{UF} = \frac{|U_2|}{|U_1|} \cdot 100\% = \frac{2,5}{35} \cdot 100\% = 6,94\%$$

Цей результат вказує на дисбаланс напруги на рівні 6,94%, що перевищує межу в 2-3% для мережі 35 кВ. Дисбаланс напруги такої величини може спричинити збільшення втрат у трансформаторі, нерівномірний розподіл струму в шинах і збільшення теплового навантаження на компоненти підстанції. У даному випадку рекомендується здійснення корекції за допомогою балансування навантаження або регулювання напруги, щоб зменшити дисбаланс і забезпечити надійність роботи обладнання.

Коефіцієнт гармонійного спотворення, який викликаний гармоніками у формі сигналу напруги [23]:

$$k_{UF} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\% = \frac{\sqrt{8^2 + 6^2 + 5^2}}{35} \cdot 100\% = 56\%$$

Цей результат значно перевищує припустиму межу 4(6)%. Гармонійні спотворення на такому рівні можуть спричинити суттєві проблеми в роботі обладнання. Для пом'якшення цих ефектів слід застосувати фільтри гармонік або інші коригувальні пристрої для зменшення вмісту гармонік у системі.

Відхилення напруги, викликане зміною навантаження, також може суттєво впливати на роботу обладнання підстанції. Відхилення напруги можуть призвести до перевищення або пониження напруги, що створює надмірне навантаження на ізоляцію електричного обладнання. Відхилення напруги за заданих умов роботи підстанції [23]:

$$\begin{aligned} \Delta U &= I \cdot (R \cdot \cos \varphi + X \cdot \sin \varphi) = \\ &= 240 \cdot (0,5 \cdot \cos 30^\circ + 0,2 \cdot \sin 30^\circ) = 120,2 \text{ В.} \end{aligned}$$

Цей результат відхилення напруги є досить суттєвим і може спричинити роботу обладнання підстанції за межами встановленого діапазону напруг, що призведе до його неефективної роботи та прискореного старіння. Щоб утримувати відхилення напруги в прийнятних межах, слід розглянути можливість використання регуляторів напруги або методів динамічної компенсації.

Додаткові втрати потужності в шинах через коливання напруги та гармонічні спотворення [23]:

$$P_{\text{шин.}} = I^2 \cdot R = 250^2 \cdot 0,2 = 12,5 \text{ кВт.}$$

Дані втрати сприяють надлишковому нагріванню шин, що може призвести до їх механічної деградації або виходу з ладу. Щоб зменшити ці втрати, важливо забезпечити збалансований розподіл струму по всіх фазах і вдосконалити конструкцію шинних систем.

Батареї конденсаторів забезпечують генерацію реактивної потужності для підтримки стабільності напруги в системі. На генерацію реактивної потужності впливають відхилення напруги та гармоніки, а коливання згенерованої реактивної потужності можуть призвести до виникнення перенапруг або зниження напруги. Реактивна потужність, яку генерує батарея конденсаторів [23]:

$$Q_{\text{конд.}} = C \cdot U^2 \cdot \omega = 2,5 \cdot (35 \cdot 10^3)^2 \cdot 2\pi \cdot 50 = 1,63 \text{ МВАр.}$$

Цей результат показує, що батарея конденсаторів забезпечує 1,63 МВАр реактивної потужності, що допомагає стабілізувати напругу в системі. Однак значні відхилення напруги або гармонійні спотворення можуть призвести до коливань цієї реактивної потужності, викликаючи нестабільність напруги та збільшуючи ризик виходу з ладу обладнання.

Втрати в трансформаторі через гармонічні спотворення, які збільшують втрати на вихрові струми і гістерезис в осерді [23]:

$$P_{\text{ос.}} = k_f \cdot B_n^2 \cdot f_n^2 = 0,15 \cdot 1,2^2 \cdot 50^2 = 10,8 \text{ кВт.}$$

Дана величина додаткових втрат в осерді трансформатора до його перегріву та зниження ефективності. Якщо ці втрати не зменшувати, трансформатор може вийти з ладу передчасно через надмірні температурні перенапруги.

Чутливість напруги до змін реактивної потужності в мережі визначає можливість підтримки стабільності напруги на підстанції [23]:

$$\frac{\partial U}{\partial Q} = \frac{1}{S} = \frac{1}{15} = 0,067 \text{ В/кВАр.}$$

Цей результат показує, що зміна реактивної потужності на 1 МВАр призведе до зміни напруги системи на 0,067 В. Ця чутливість підкреслює важливість підтримки стабільного постачання реактивної потужності для запобігання коливанням напруги, які можуть порушити роботу підстанції.

Втрати потужності через гармонійні спотворення в шинах можуть бути досить суттєвими, особливо за наявності гармонік вищого порядку [23]:

$$P_{\text{ш.гарм.}} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n = (50^2 + 40^2 + 30^2) \cdot 0,2 = 1 \text{ кВт.}$$

Даний результат показує, що гармонічні спотворення викликають 1 кВт додаткових втрат у шинах. Ці втрати сприяють посиленню нагріву і знижують загальну ефективність системи. При зростанні гармонічних спотворень можуть бути згенеровані механічні коливання шин, що з часом може спричинити їх фізичне руйнування.

Втрати потужності в трансформаторах через гармонічні спотворення [23]:

$$P_{\text{тр.гарм.}} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n = (60^2 + 50^2 + 40^2) \cdot 0,15 = 1,16 \text{ кВт.}$$

Отримані втрати викликають додатковий перегрів у трансформаторах, що прискорює деградацію ізоляції та скорочує термін служби трансформатора. Зменшення цих втрат за допомогою фільтрів гармонік

або вдосконалених конструкцій трансформаторів має важливе значення для підвищення параметрів надійності.

Гармонічні спотворення призводять до додаткових втрат в обмотках трансформатора, які необхідно враховувати [23]:

$$P_{\text{втр. гарм.}} = I_1^2 \cdot R + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n =$$

$$= 240^2 \cdot 0,4 + (60^2 + 50^2) \cdot 0,5 = 26,09 \text{ кВт.}$$

Додаткові втрати потужності в трансформаторах через відхилення напруги призводять до неоптимальної роботи, збільшуючи втрати мідних провідниках обмоток [23]:

$$P_{\text{тр. відх}} = I^2 \cdot R = 240^2 \cdot 0,35 = 20,16 \text{ кВт.}$$

Отримані втрати сприяють загальному виділенню тепла в трансформаторі та збільшують ризик пошкодження ізоляції. Забезпечення того, щоб напруга залишалася в межах припустимих відхилень, має вирішальне значення для мінімізації цих втрат і продовження терміну служби трансформатора.

Флікер може бути спричинене швидкими змінами напруги, що впливають на режими роботи систем освітлення, а також може призвести до збоїв у роботі чутливого обладнання. Індекс інтенсивності мерехтіння (флікера) складе [23]:

$$P_{\text{фл.}} = 0,9 \cdot \left(\frac{\Delta U}{U_{\text{ном}}} \right) = 0,9 \cdot \frac{3}{35} = 0,077.$$

Результат показує, що індекс інтенсивності мерехтіння (флікера) нижче типового порогового значення 1,0. Хоча це вказує на те, що мерехтіння не є суттєвою проблемою в цьому випадку, більші коливання напруги можуть збільшити значення, що призведе до видимого мерехтіння та потенційного дискомфорту для користувачів або пошкодження чутливого електронного обладнання.

Розрахунок дисбалансу напруги, гармонійних спотворень, відхилення напруги, втрат на шинах, реактивної потужності та чутливості до напруги забезпечують комплексну оцінку впливу порушень якості електричної енергії на обладнання підстанції. Асиметрія напруги та гармонічні спотворення значно збільшують втрати в трансформаторах і шинах, тоді як відхилення напруги створюють додаткове навантаження на обладнання підстанції, потенційно призводячи до передчасного виходу з ладу її обладнання. Результати підкреслюють важливість зменшення цих впливів за допомогою фільтрації гармонік, регулювання напруги та динамічної компенсації реактивної потужності для забезпечення надійної та ефективної роботи електричних підстанцій. По-перше, необхідно ретельно проаналізувати відхилення напруги та їх вплив на ефективність роботи трансформатора, оскільки відхилення можуть призвести до значного зниження продуктивності. Коли відхилення напруги перевищують допустимий рівень, трансформатор починає працювати в неоптимальних умовах, що призводить до збільшення втрат і виникнення потенційних пошкоджень. Допуск на відхилення напруги встановлюється на рівні $\pm 5\%$ від номінального значення [23]:

$$U_{\max} = U_{\text{ном}} + (U_{\text{ном}} \cdot 0,05) = 35 \cdot 10^3 + 35 \cdot 10^3 \cdot 0,05 = 36,75 \text{ кВ},$$

$$U_{\min} = U_{\text{ном}} - (U_{\text{ном}} \cdot 0,05) = 35 \cdot 10^3 - 35 \cdot 10^3 \cdot 0,05 = 33,25 \text{ кВ}.$$

Робота поза визначеними межами може призвести до перегріву трансформатора та надмірного навантаження на його ізоляцію. Постійний вплив таких умов прискорює старіння трансформатора та підвищує ризик його виходу з ладу.

Іншим фактором, який слід враховувати, є падіння напруги у лініях електропередач, яке також може сприяти відхиленням напруги, що спостерігаються на підстанції. На падіння напруги впливає повний опір лінії та струм, що протікає по ній [23]:

$$\begin{aligned}\Delta U_{\text{л}} &= I \cdot (r \cdot \cos \varphi + x \cdot \sin \varphi) = \\ &= 240 \cdot (0,4 \cdot \cos 30^\circ + 0,2 \cdot \sin 30^\circ) = 107,14 \text{ В.}\end{aligned}$$

Надмірне падіння напруги можуть призвести до того, що обладнання на підстанції буде отримувати напругу, нижчу за допустимі межі, тим самим знижуючи ефективність роботи та збільшуючи ризик несправності обладнання. Щоб мінімізувати падіння напруги, необхідно розглянути покращення опору лінії або компенсації реактивної потужності.

Зазначені втрати значно збільшують теплове навантаження на трансформатор, що призводить до потенційного перегріву та зниження його загальної ефективності.

Втрати потужності в лініях електропередач через незбалансовані струми, що викликані несиметрією, є ще одним важливим фактором, який слід враховувати. Дисбаланс напруг призводить до неоднаковості струмів, що протікають через фази, що призводить до вищих резистивних втрат [23]:

$$\begin{aligned}P_{\text{несим.}} &= I_{\text{max}}^2 \cdot R_{\text{max}} + I_{\text{min}}^2 \cdot R_{\text{min}} = \\ &= 250^2 \cdot 0,3 + 230^2 \cdot 0,3 = 34,62 \text{ кВт.}\end{aligned}$$

Отримані втрати не тільки знижують ефективність системи, але й викликають додаткове нагрівання провідників лінії, що може призвести до механічної втоми та виходу їх з ладу. Зменшення несиметрії напруги за допомогою запровадження різних методів балансування навантаження або компенсації має вирішальне значення для мінімізації цих втрат.

Гармонійні струми, що протікають через батареї конденсаторів, можуть призвести до перегріву та потенційного виходу з ладу діелектричного матеріалу конденсаторів. Струм, що протікає через конденсатори за наявності гармонік [23]:

$$I_{БК} = \frac{Q_{БК}}{U} = \frac{2,5 \cdot 10^6}{35 \cdot 10^3} = 87,5 \text{ кА.}$$

Для захисту конденсаторів від пошкодження гармоніками, необхідно встановлювати фільтри гармонік, які обмежують протікання струмів високої частоти. Забезпечення належного керування батареями конденсаторів та іншими пристроями з реактивною потужністю має вирішальне значення для підтримки стабільності напруги.

Відхилення напруги можуть викликати значні коливання реактивної потужності, що подається батареями конденсаторів, і призводить до нестабільного регулювання напруги [23]:

$$\begin{aligned} \Delta Q &= C \cdot \Delta U^2 \cdot \omega = \\ &= 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot (0,03 \cdot 35 \cdot 10^3)^2 \cdot 2\pi \cdot 50 = 0,865 \text{ кВАр.} \end{aligned}$$

Цей результат показує, що коливання напруги на рівні 3% призводить до відхилення реактивної потужності 0,865 кВАр. Такі коливання можуть викликати нестабільність напруги, особливо в системах, чутливих до змін реактивної потужності.

Системи динамічної компенсації реактивної потужності необхідні для того, щоб коливання напруги не призводили до надмірних відхилень реактивної потужності.

Дисбаланс напруги викликає нерівномірний розподіл напруг між батареями конденсаторів, що призводить до зміни вихідної реактивної потужності та збільшує ризик пробою діелектрика [23]:

$$Q_{\text{БК асим.}} = C \cdot (U_{\phi})^2 \cdot \omega = \\ = 2,5 \cdot 10^{-6} \cdot (0,97 \cdot 35 \cdot 10^3)^2 \cdot 2\pi \cdot 50 = 0,91 \text{ МВАр.}$$

Це показує, що незбалансована батарея конденсаторів забезпечує 0,91 МВАр реактивної потужності, що нижче очікуваного значення 2,5 МВАр через дисбаланс напруги. Це може призвести до нестабільності напруги та збільшення навантаження на батареї конденсаторів, що зрештою може спричинити збої, якщо не врегулювати це питання належним чином.

Наявність гармонійних спотворень в енергосистемі може призвести до різноманітних проблем, зокрема до збільшення втрат на вихрові струми та втрат на гістерезис у трансформаторах. Гармонійні струми можуть індукувати магнітні потоки, які працюють на частотах, вищих за основну частоту, що призводить до вищих втрат. Загальні втрати на вихрові струми через гармонічні спотворення в осерді трансформатора [23]:

$$P_{\text{вихр.}} = k_e \cdot f^2 \cdot B_{\text{гарм.}}^2 = 0,8 \cdot 50^2 \cdot 1,1^2 = 2,42 \text{ кВт.}$$

Отримані втрати можуть викликати перегрів осердя трансформатора та скоротити його загальний термін служби.

Гармонійні спотворення змінюють форму та значення магнітного потоку, збільшуючи втрати на гістерезис [23]:

$$P_{\text{гист.}} = k_h \cdot B_{\text{гарм.}}^\alpha \cdot f^\beta = 0,5 \cdot 1,15^2 \cdot 50^2 = 1,65 \text{ кВт.}$$

Як і у випадку з втратами на вихрові струми, ці втрати призводять до додаткового виділення тепла в трансформаторі, збільшуючи ймовірність пробою ізоляції та знижуючи ефективність. Забезпечення мінімізації гармонійних спотворень за допомогою відповідних фільтрів має вирішувати значені проблеми.

Гармоніки викликають додаткові струми, які можуть вплинути на здатність автоматичних вимикачів до адекватного спрацювання. Значення середньоквадратичного струму за наявності гармонік [23]:

$$I_{\text{RMS}} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} = \sqrt{240^2 + 60^2 + 50^2} = 252,4 \text{ А.}$$

Якщо вимикач відкалібровано лише по основному значенню струму, він може спрацювати передчасно через високе середньоквадратичне значення або не спрацювати за потреби під час несправності. Правильне калібрування вимикачів для врахування гармонійних струмів є важливим для забезпечення належного захисту систем.

Втрати потужності через гармоніки в шинах [23]:

$$P_{\text{шин. гарм.}} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 \cdot R_n = (60^2 + 50^2) \cdot 0,25 = 1,53 \text{ кВт.}$$

Ці втрати призводять до збільшення нагрівання та зниження ефективності розподілу електроенергії в межах підстанції. Вирішення цієї проблеми за допомогою фільтрації гармонік допоможе підтримувати ефективність шин і продовжить термін експлуатації обладнання.

Представлений комплексний набір розрахунків, що охоплює дисбаланс напруги, гармонічні спотворення, коливання напруги та втрати потужності, демонструє значний вплив цих збурень на обладнання підстанції. Кожне з отриманих значень підкреслює важливість контролю цих збурень за допомогою фільтрів гармонік, компенсації реактивної потужності та регулювання напруги для забезпечення надійної роботи трансформаторів, збірних шин, автоматичних вимикачів і батарей конденсаторів. Вирішення цих проблем має вирішальне значення для підтримки ефективності системи, зменшення втрат і продовження терміну служби компонентів підстанції.

3.2 Підвищення якості електричної енергії шляхом зменшення несиметрії у мережі

Поліпшення якості електричної енергії можливо шляхом зменшення несиметрії у мережі. Це можна зробити шляхом застосування двофазних симетричний трансформаторів у поєднанні з традиційними трифазними трансформаторами. Завдяки такій конфігурації здійснюється оптимальний розподіл навантаження, мінімізується неефективність, викликана несиметрією та забезпечується відповідність стандартам якості.

Максимальне значення оперативного струму через трансформатор [24]:

$$I_{\max} = \frac{k_{\text{пер.}} \cdot S_{\text{ном.тр.}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}}} = \frac{1,3 \cdot 15 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 10^3} = 321,7 \text{ А.}$$

$k_{\text{пер.}}$ – коефіцієнт перевантаження, $k_{\text{пер.}} = 1,3$,

$S_{\text{ном.тр.}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА $S_{\text{ном.тр.}} = 15$ МВА.

Цей струм визначає оптимальну величину навантаження на трансформатор, коли балансування можливо за рахунок оперативних заходів.

Для перерозподілу навантаження необхідно розподілити даний струм між обома трансформаторами рівномірно – по 160,85 А.

При розрахунку коефіцієнтів несиметрії струмів в електричних мережах, зокрема для аналізу несиметрії струмів у трифазних трансформаторах, можна кількісно оцінити ступінь асиметрії в навантаженнях між фазами електричної системи.

Коефіцієнт k_{21} дає змогу визначити асиметрію струму на основі відношення навантаження в одній фазі до навантаження на іншій (n). Вищі значення вказують на більшу ступінь асиметрії в системі [24]:

$$k_{21} = \frac{\sqrt{n^2 - n + 1}}{n + 1}.$$

За мірою збільшення числового значення n , коефіцієнт асиметрії зменшується, що свідчить про те, що збалансовані навантаження призводять до зменшення асиметрії. Це критично важливо для забезпечення стабільності та ефективності енергосистеми. Високі значення k_{21} можуть свідчити про потенційні проблеми, такі як перегрів трансформаторів, підвищені втрати та погіршення продуктивності обладнання через нерівномірне навантаження.

Коефіцієнт α_1 відображає ступінь асиметрії у роботі трифазного трансформатора при зміні відношень навантаження – n [24]:

$$\alpha_1 = \frac{1 - n}{1 + n}.$$

Позитивне значення α_1 вказує на відносно збалансоване навантаження, тоді як негативне значення свідчить про значний дисбаланс навантаження. Даний коефіцієнт при $n = 1$ (ідеально збалансовані навантаження) означає збалансований стан навіть при наявності нерівномірних навантажень. При $\alpha_1 = 0$ маємо ситуацію відсутності асиметрії. За мірою зміни значення асиметрія зростає, що впливає на ефективність роботи трансформатора. Високі негативні значення коефіцієнта α_1 можуть призвести до зниження ефективності, підвищення струмів у нейтралі та проблем з регулюванням напруги, що веде до негативних наслідків для підключених навантажень.

Коефіцієнти k_{21} та α_1 є важливими показниками для оцінки продуктивності та надійності електричних мереж. Кількісно оцінюючи рівень асиметрії у струмах навантаження, оператори можуть вжити коригувальних заходів, таких як балансування навантаження, що покращує стабільність системи, зменшує втрати та підвищує загальний термін служби електричного обладнання.

Визначимо величини даних коефіцієнтів для різних співвідношень навантажень – табл. 3.1.

Графічна інтерпретація зміни коефіцієнтів несиметрії при різних співвідношення навантажень фаз наведено на рис. 3.1. Графік, що ілюструє залежності коефіцієнтів асиметрії k_{21} та α_1 від співвідношень навантажень n , визначає динаміку поведінки електричних систем в умовах нерівномірного навантаження. Коефіцієнт асиметрії k_{21} демонструє тенденцію до зменшення при збільшенні навантаження. Це вказує на підвищення асиметрії струму, що може свідчити про дисбаланс в навантаженнях між фазами. При нульовому навантаженні значення k_{21} дорівнює 1, але зі зростанням коефіцієнта навантаження воно зменшується

до значення менше 0,5 (при $n = 2$), що вказує на помітне зростання асиметрії.

Таблиця 3.1 – Коефіцієнти несиметрії при різних співвідношення навантажень фаз

Співвідношення навантажень, n	Коефіцієнт асиметрії, k_{21}	Коефіцієнт асиметрії, α_1
0,0	1,000	– 1,000
0,2	0,980	– 0,707
0,4	0,926	– 0,309
0,6	0,847	0,309
0,8	0,750	0,707
1,0	0,667	1,000
1,2	0,588	1,000
1,4	0,520	0,707
1,6	0,464	0,309
1,8	0,417	– 0,309
2,0	0,385	– 0,707

Коефіцієнт асиметрії α_1 також демонструє зменшення, проте з характеристикою, що свідчить про зростання асиметрії струму, хоча і менш різко в порівнянні зі значенням k_{21} . Графік свідчить про те, що хоча асиметрія наявна, система здатна її компенсувати, оскільки значення α_1 коливаються від –0,15 до 1,0, що свідчить про стабільність системи при зростанні навантаження, проте необхідно дотримуватися певних меж, щоб уникнути надмірного навантаження.

Зростання асиметрії, що проявляється через зменшення коефіцієнта k_{21} , підкреслює необхідність управління навантаженнями для запобігання перевантаженням і підвищенню температури в трансформаторах, що може

призвести до його виходу з ладу. Значення α_1 демонструють, що, незважаючи на наявність асиметрії, система має можливість компенсувати її до певної міри. Таким чином, балансування навантаження в трифазних системах є критично важливим для забезпечення стабільності, зменшення втрат і подовження терміну служби електричного обладнання. Визначення і контроль цих коефіцієнтів є необхідними для підтримання ефективності та надійності електричних систем.

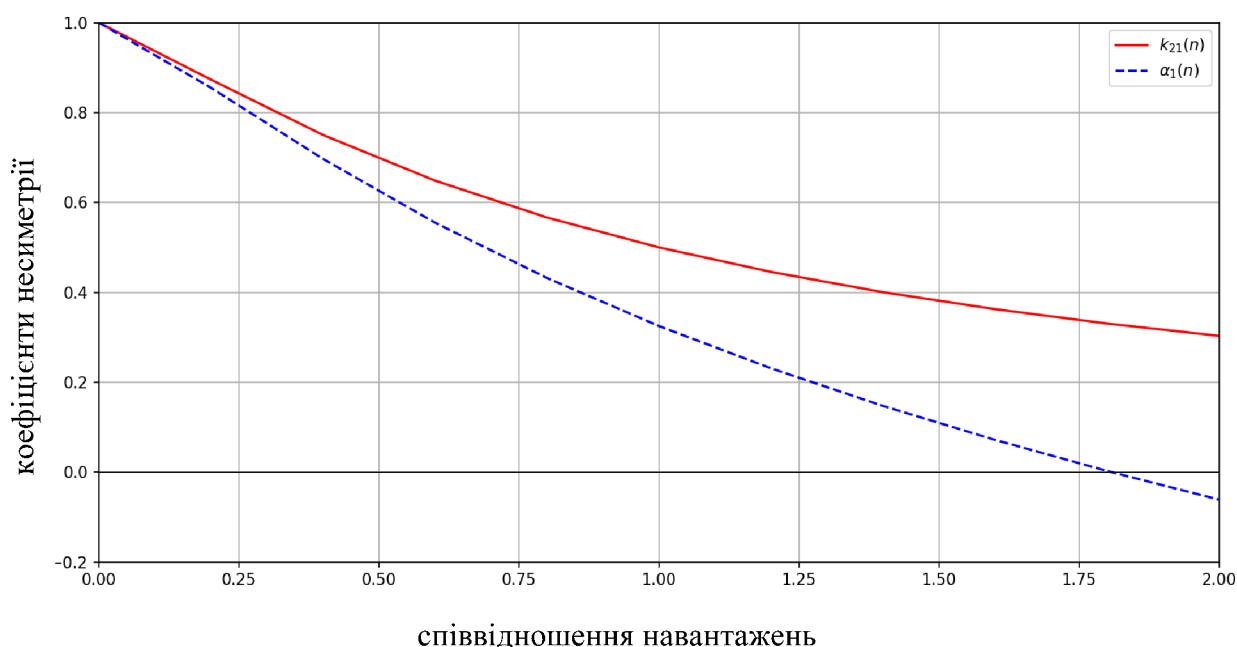


Рисунок 3.1 – Залежність коефіцієнтів асиметрії струму від співвідношень навантажень

4 МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ПОРУШЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ НА ЕЛЕКТРИЧНІЙ ПІДСТАНЦІЇ

Моделювання відіграє важливу роль у вивченні режимів роботи електрообладнання та слугує важливим інструментом для дослідників та інженерів. Існуюча складність електричних систем вимагає складних підходів для прогнозування та аналізу поведінки різних компонентів за різних умов експлуатації. Використання моделей дозволить визначити та врахувати взаємодії в електричних системах, забезпечити повне розуміння їх динаміки без необхідності здійснення натурних експериментів [25].

Завдяки моделюванню можна ефективно оцінити вплив різних факторів порушення якості електричної енергії, таких як асиметрія напруги, несинусоїдальні форми хвиль та коливання навантаження, на ефективність роботи електрообладнання. Моделі дозволяють ідентифікувати потенційні проблеми в роботі та оцінювати стійкість систем за ненормальних умов роботи. Використання принципів моделювання значно скорочує витрати та час, пов'язані з традиційними експериментами, забезпечуючи практичну альтернативу для оцінки змін у конструкції або усунення неефективності існуючих систем. Передові обчислювальні методи та програмні засоби полегшують інтеграцію складних змінних, даючи можливість моделювати реальні сценарії та поведінки. Це може мати вирішальне значення для розробки надійних систем, які здатні протистояти різним перешкодам, забезпечуючи надійність та безпеку роботи електричних станцій. Уявлення, отримані в результаті моделювання, сприяють постійному вдосконаленню систем електропостачання. За умов необхідності постійного удосконалення галузевих стандартів і підвищення вимог до якості електропостачання, здатність моделювати та аналізувати різні конфігурації електричних систем стає все більш важливим завданням. Такі можливості моделювання

здатне не тільки забезпечити оптимізацію існуючих систем, але й сприятиме розробці інноваційних рішень для задоволення сучасних енергетичних потреб [25].

У якості засобу моделювання у своїй роботі будемо використовувати програмне середовище MATLAB/Simulink – це потужна програмна платформа, яка широко використовується для моделювання, імітації та аналізу електричних систем, зокрема електричних підстанцій. Дане програмне середовище надає комплексний набір інструментів, які полегшують проектування та оцінку складних електричних мереж. MATLAB пропонує надійну мову програмування та обчислювальне середовище, тоді як Simulink надає графічний інтерфейс для моделювання динамічних систем за допомогою блок-схем. Разом вони створюють інтегровану платформу, яка підвищує ефективність і точність системного аналізу [26].

У контексті електричних підстанцій MATLAB/Simulink дозволяє інженерам і дослідникам моделювати різноманітні сценарії, які дозволять краще зрозуміти поведінку обладнання підстанцій за різних умов навантаження, аварійних подій та збоїв. Зазначене програмне забезпечення включає спеціалізовані набори інструментів, такі як Simscape Electrical toolbox, які містить попередньо визначені блоки для моделювання електричних компонентів, включаючи трансформатори, автоматичні вимикачі та захисні реле. Ця функція дозволяє користувачам створювати детальні та точні моделі підстанцій, які відображають їх реальні конфігурації. Можливість «запускати» динамічне моделювання дозволяє аналізувати перехідні явища, такі як провали, сплески та коливання напруги в системах. Впроваджуючи алгоритми керування в середовищі Simulink, можна визначати вплив різних стратегій керування на стабільність і продуктивність роботи електрообладнання та систем, до яких це обладнання входить [26].

Універсальність середовища MATLAB/Simulink поширюється на його здатність інтеграції з іншим програмним і апаратним забезпеченням, полегшуючи тестування обладнання в різних режимах роботи та здійснюючи симуляцію в реальному часі. Така інтеграція дозволить покращити процес перевірки стратегій управління та різних конструкцій, дозволяючи перейти від моделювання до практичної реалізації. Значний об'єм документації та розгалужена спільнота користувачів MATLAB, здатні надати цінні ресурси для користувачів. Велика кількість існуючих моделей та структур сприяє обміну знаннями та дозволяє впроваджувати інновації під час моделювання електричних систем. Отже, MATLAB/Simulink може бути незамінним інструментом для ефективного моделювання електричних підстанцій для здійснення детального аналізу електротехнічних систем [26].

Будова моделі електропостачання в середовищі Simulink дозволить здійснити аналіз впливу відхилень напруги та гармонійних коливань на функціонування електричних систем, зокрема на електричних підстанціях. Моделювання дозволяє дослідникам імітувати реальні умови роботи, коли несинусоїдальні форми сигналів суттєво впливають на ключові електричні параметри, такі як напруга та струм. Для характеристики зазначених відхилень від ідеальних синусоїдних форм може бути використаний коефіцієнт синусоїдальності, який надає розуміння впливу зазначених факторів на параметри системи.

У середовищі Simulink модель джерела живлення починається з інтеграції джерел живлення, які можуть бути налаштовані як трифазні або однофазні системи. Трифазні джерела живлення переважають на підстанціях через їх здатність забезпечувати постійність високих значень потужності та підвищену ефективність роботи обладнання. Використання трифазних систем дозволяє точніше відобразити поведінку електричної мережі, де зазвичай виникають дисбаланс фаз і відхилення значення напруги. Модель може бути налаштована для імітації різних конфігурацій,

включаючи як збалансовані, так і незбалансовані системи, що дозволить проаналізувати їх вплив на загальну ефективність. Критичним аспектом для створеної моделі є вимірювання струму та напруги, які надають необхідні дані для аналізу поведінки системи за різних умов роботи. Інструменти точного вимірювання величин є інтегрованими в модель, що дозволяє контролювати електричні параметри в реальному часі. Дані, отримані при вимірюваннях, можна використовувати для оцінки відповідності галузевим стандартам відносно якості електричної енергії та для оцінки працездатності електричного обладнання. Модель повинна враховувати наявні в системі механічні навантаження, які можуть впливати на загальну динаміку електропостачання. Різноманітні механічні навантаження, які можуть взаємодіяти з електричною системою, такі як трансформатори та реактори, повинні також повинні бути реалізовані. Розуміння взаємодії між електричними параметрами та механічними навантаженнями має важливе значення для оптимізації конструкції та експлуатації підстанцій [26].

Отже, будова моделі електропостачання в середовищі Simulink передбачає комплексний підхід, який інтегрує джерела живлення, вимірювальні пристрої та механічні навантаження, що стосуються електричних підстанцій. Включаючи ці елементи, модель ефективно моделює складні електричні системи, дозволяючи детально аналізувати вплив відхилень напруги та гармонійних коливань.

Зміна параметрів моделювання є ключовим аспектом моделювання електричних систем у таких середовищах, як Simulink, що дозволяє визначати вплив різних умов на роботу системи. Один із основних методів налаштування параметрів моделювання передбачає навмисну зміну напруг для моделювання її асиметрії та відхилень. Використовуючи контрольовані відхилення фазних напруг під час моделювання, можна оцінити те, як такі дисбаланси впливають на загальну стабільність і ефективність системи. Величину напруг можна змінювати шляхом

застосування попередньо визначених коефіцієнтів, які представляють різні ступені асиметрії. Введення позитивних або негативних зсувів до значень номінальної напруги може ефективно імітувати різні робочі сценарії, такі як умови підвищеної або зниженої напруги. Крім того, програмне забезпечення дозволяє інтегрувати параметри гармонійних спотворень, дозволяючи здійснювати більш повний аналіз того, як несинусоїдальні форми хвилі впливають на електричні характеристики.

Ще одним важливим компонентом зміни параметрів моделювання є дослідження різних режимів навантаження. Умови навантаження значно впливають на поведінку електричних систем, і розуміння того, як ці режими взаємодіють з відхиленнями напруги, має першочергове значення для здійснення оптимізації системи. Імітуючи умови нормального, підвищеного та зниженого навантаження, можна здійснювати аналіз реакції електричної мережі за різних робочих навантажень. Нормальні умови навантаження відображають типові робочі сценарії, тоді як умови підвищеного навантаження можуть імітувати стани перевантаження, коли обладнання може вийти за встановлені межі. І навпаки, умови зниженого навантаження можуть надати уявлення про те, як система поводить себе під невеликим навантаженням або в умовах простою.

Для здійснення аналізу характеристик трифазної електричної системи з урахуванням різних параметрів, таких як відхилення напруги, гармонійні спотворення та зміни навантаження створимо модель Simulink (рис. 4.1). Модель імітує роботу системи електропостачання та призначена для вимірювання ключових параметрів електричної енергії: активну, реактивну та повну потужність, як на стороні живлення, так і на стороні споживання, а також значення струмів і напруг.

Основним компонентом моделі є джерело живлення, а RMS-блоки використовуються для обчислення середньоквадратичних значень напруги та струму в кожній фазі (A, B і C). Ці напруги подаються в блоки, які обчислюють активну, реактивну та загальну потужність. Активна

потужність розраховується шляхом множення фазної напруги та струму, при цьому реактивна потужність обчислюється аналогічно, але з використанням коефіцієнта потужності. Загальна потужність розраховується шляхом підсумовування активної та реактивної потужностей (реалізується за допомогою блоку Σ) [26].

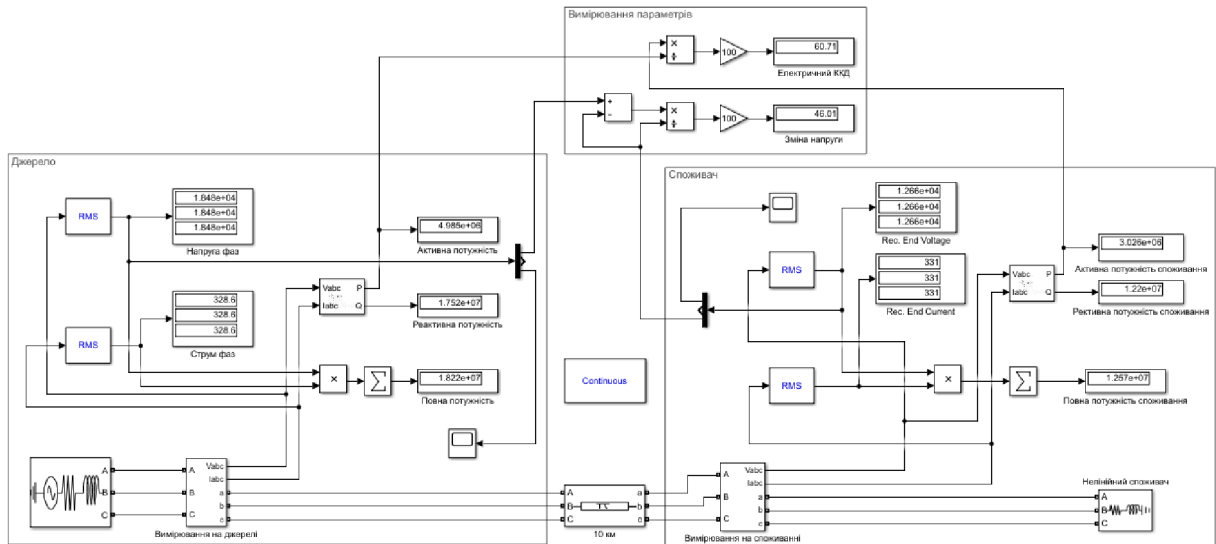


Рисунок 4.1 – Модель для аналізу характеристик трифазної електричної системи

Система також містить перемикачі (S1), які імітують зміну навантаження або умов роботи мережі. Дані перемикачі реалізують зміну напруги або струму живлення, які потім контролюються системою вимірювання. Система вимірювання напруги за трьома каналами (A, B, C) обчислює падіння напруги на навантаженні з відхиленнями фазної напруги, що викликає зміни струмів.

Модель також включає вимірювання електричного ККД системи шляхом розрахунку загального споживання електроенергії споживачами та порівняння з вихідною потужністю від джерела – розраховується як відношення загальної вихідної потужності до потужності, що подається.

Використання блоків «RMS» забезпечує точне відстеження електричних параметрів у режимі реального часу в несинусоїдальних

режимах роботи. Здатність системи моделювати різні умови навантаження та відхилення напруги дає цінну інформацію про те, як електричне обладнання, зокрема на підстанціях, працює за різних робочих навантажень і неідеальних умов. Графіки, що відображають зазначені коливання, дозволяють аналізувати поведінку системи у відповідь на ці коливання.

Нелінійні споживачі можуть суттєво впливати на величину коливання напруги та генерації несинусоїдальних складових в електричній системі. Ці типи навантажень демонструють характеристики, які суттєво відрізняються від лінійних споживачів, оскільки вони не споживають струм пропорційно прикладеній нарузі. Замість цього вони зазвичай споживають струм імпульсами або через різні інтервали, що призводить до гармонійних спотворень в енергосистемі.

У моделі Simulink наявність нелінійних споживачів може бути реалізована за рахунок включення спеціалізованих блоків, що імітують ці навантаження. Коли ці пристрої вмикають і вимикають струм або працюють у певних циклах, вони створюють гармонічні струми. Ці гармоніки поєднуються з основною частотою системи, тим самим спотворюючи форму хвилі напруги та викликаючи її несинусоїдальність.

Вплив нелінійних споживачів на коливання напруги можна спостерігати в моделі через введення гармонійних складових, які впливають на форму сигналу напруги в різних точках системи. Спотворення напруги характеризується повним гармонійним спотворенням і може призвести до різноманітних проблем у роботі енергосистем, включаючи перегрів обладнання, несправності та потенційні збої. Модель Simulink дозволяє спостерігати за цими коливаннями напруги в режимі реального часу, імітуючи вплив нелінійних навантажень за різних умов роботи. Крім того, несинусоїдальний характер системи можна кількісно визначити за допомогою гармонійного вмісту напруги та струму. У моделі це досягається за допомогою аналізу форм сигналів напруги та

струму, де аналізуються відхилення від чистої синусоїдальної форми, щоб визначити ступінь несинусоїдальності. Моделювання може продемонструвати, як зміна типу навантаження та інтенсивності нелінійних споживачів безпосередньо впливає на якість електричної енергії, зокрема з точки зору коливань напруги, гармонійних спотворень і загальної ефективності електричної системи.

Результати такого моделювання може бути показано на прикладі зміни струмів у відношенні від відхилення фазних напруг (рис. 4.2).

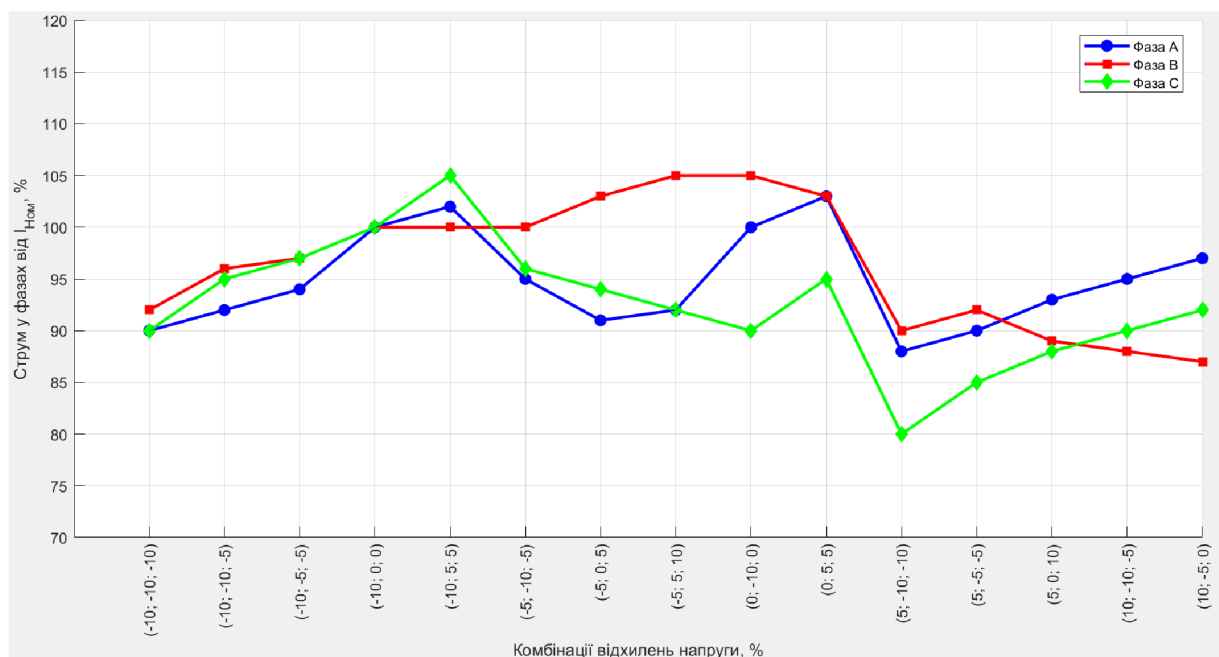


Рисунок 4.2 – Графік зміни струмів у відношенні від відхилення фазних напруг

Представлені графіки ілюструють зв'язок між фазними струмами та різними комбінаціями відхилень напруги в трифазній електричній системі. Зокрема, струми, виражені у відсотках від номінального струму, залежать від комбінації відхилень напруги. Отримані дані проявляють чіткі закономірності в поведінці кожної фази. Фаза В постійно демонструє найвищі рівні струму в більшості комбінацій відхилення напруги, що свідчить про значну реакцію на зміни напруги і вказує на потенційний

дисбаланс у системі. Навпаки, фаза С демонструє більш стабільну реакцію з меншими коливаннями струму, тоді як фаза А показує різні рівні струму, особливо в умовах суттєвих відхилень напруги.

Отримані дані підкреслюють вплив асиметрії напруги на фазні струми, наголошуючи на необхідності ефективного управління та моніторингу умов напруги для підтримки стабільності системи. Оскільки відхилення напруги збільшуються, стає очевидним, що «ефективність» фази В ще більше відрізняється від інших фаз, що підвищує вірогідність критичних станів при наявності незбалансованості рівнів напруг.

Зазначене підкреслює важливість проведення ретельного аналізу оцінки продуктивності електричних систем за неідеальних умов експлуатації, особливо при відхиленнях величини напруги та дисбалансу фаз на загальну ефективність і надійність системи.

Графіки, що показують зміну струмів у фазах залежно від коефіцієнта несинусоїдальності представлено на рис. 4.3.

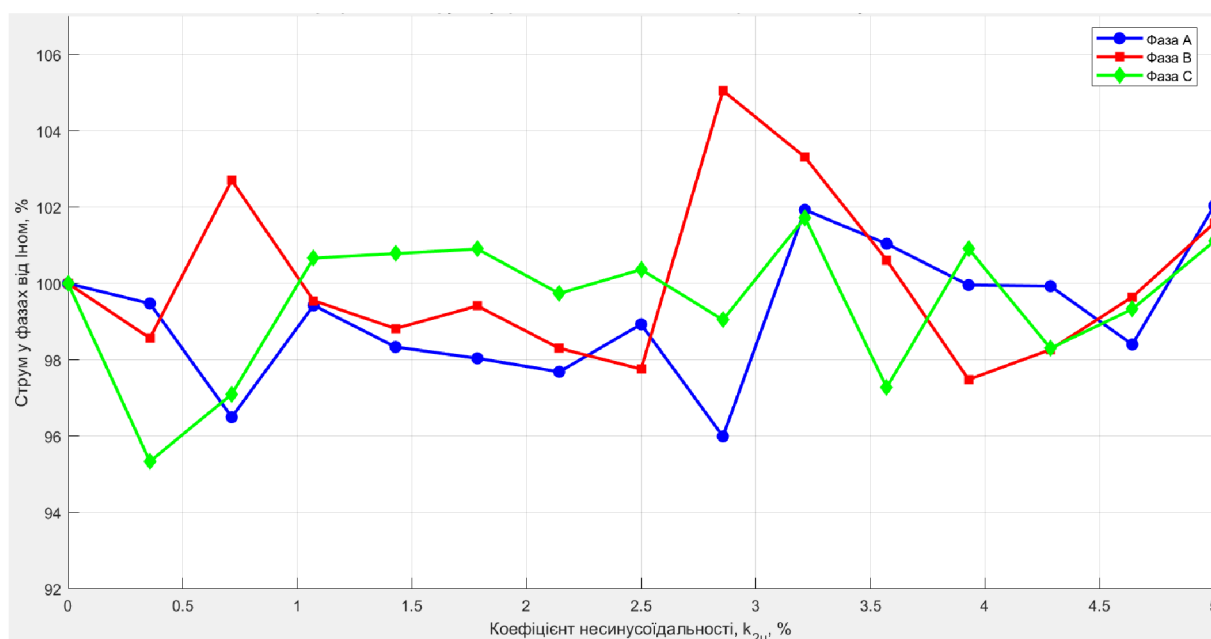


Рисунок 4.3 – Графік зміни струмів у фазах залежно від коефіцієнта несинусоїдальності

Представлений графік ілюструє залежність між коефіцієнтом несинусоїдальної напруги (k_{2u}) і відповідними фазними струмами, вираженими у відсотках від номінального струму ($I_{ном}$) у трьох фазах (А, В і С) в електричній системі. На осі абсцисс відображаються значення несинусоїдального коефіцієнта, а на осі ординат – поточні рівні струму в кожній фазі.

Аналіз графіка показує, що зі збільшенням коефіцієнта несинусоїдальності напруги, струми в усіх трьох фазах суттєво коливаються, що свідчить про кореляцію між умовами несинусоїдальної напруги та відгуками фазного струму. Досить помітно, що фаза В демонструє найвищі значення струму за більшістю значень коефіцієнта, що вказує на більшу чутливість до спотворень напруги. Навпаки, фаза С підтримує більш стабільний рівень струму, хоча й з деякими коливаннями, тоді як у фазі А змінюється, відображаючи як збільшення, так і зменшення відносно змін зазначеного коефіцієнта.

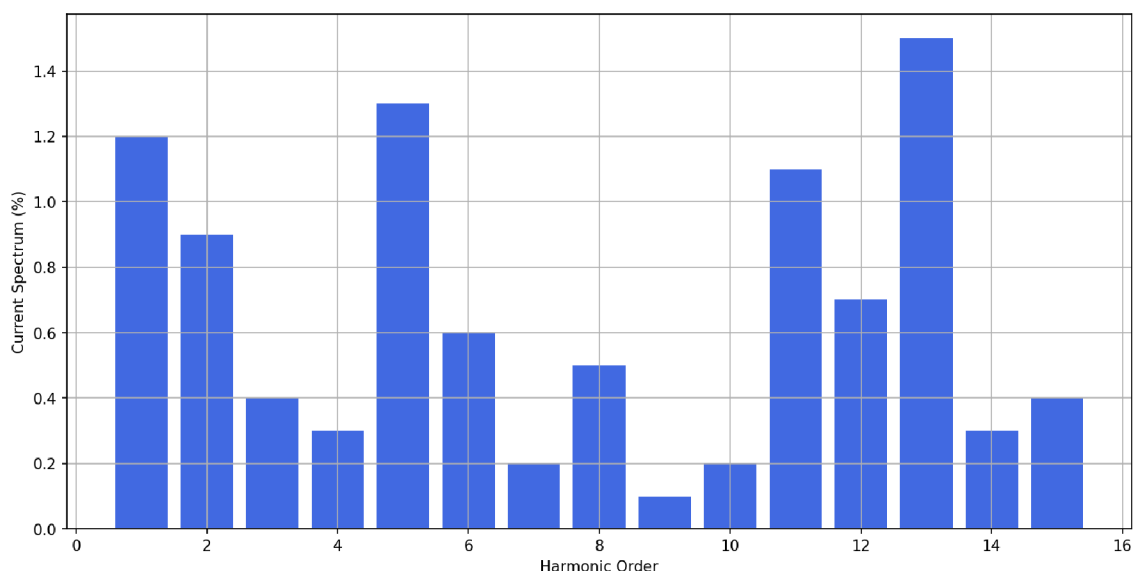


Рисунок 4.4 – Розподіл струмів окремих гармонік

Здійснений аналіз підтверджує вплив несинусоїдальних умов на ефективність роботи електричного обладнання, зокрема необхідність ретельного моніторингу якості напруги для зменшення потенційних

негативних впливів на критичну зміну фазних струмів. Відмінності у відгуках між фазами підкреслюють важливість розуміння впливу гармонійних спотворень і асиметрії напруги, оскільки ці фактори можуть суттєво впливати на ефективність роботи та надійність електричних систем. Ці знання дозволять оптимізувати роботу електричних підстанцій та інших критичних компонентів електричної інфраструктури.

ВИСНОВКИ

Оцінка впливу несиметрії напруги, несинусоїдальних спотворень і відхилень напруги на роботу електрообладнання підстанцій відіграє вирішальну роль у забезпеченні стабільної роботи та ефективності електротехнічних систем. Оскільки електричні підстанції є основними компонентами мереж розподілу електроенергії, розуміння того, як різні порушення якості електроенергії впливають на обладнання, є життєво важливим для запобігання можливим збоям і забезпечення надійної роботи.

Дослідження підтверджує, що асиметрія напруги, а також гармонійні спотворення можуть призвести до значних проблем в роботі обладнання підстанції. Навіть незначні відхилення напруги можуть призвести до збільшення втрат, перегріву обладнання та зниження ефективності. Вплив несинусоїдальних форм сигналу, про що свідчить наявність гармонійних спотворень, ще більше загострює ці проблеми, що призводить до зниження терміну служби такого обладнання.

Завдяки використанню математичного моделювання та моделювання в Simulink було оцінено вплив відхилень напруги та гармонійних спотворень на продуктивність системи в різних умовах навантаження. Результати показують, що в умовах високої асиметрії напруги або гармонійних спотворень ефективність роботи електричного обладнання значно погіршується, і необхідні додаткові заходи для зменшення впливу зазначених ефектів. Імітаційна модель, розроблена в цьому дослідженні показала гарні результати для прогнозування поведінки обладнання за ненормативних умов роботи, дозволяючи краще планувати та проектувати електричні підстанції.

Результати також підкреслюють важливість точного моніторингу якості електроенергії та впровадження коригувальних заходів, таких як

встановлення фільтрів гармонік та стабілізаторів напруги. Забезпечення високого рівня якості електричної енергії має важливе значення для підтримки надійності та довговічності обладнання підстанції. Оскільки підстанції все частіше стикаються з динамічними змінами навантаження та несинусоїдальними збуреннями, потреба в передових системах діагностики та керування стає ще більш критичною.

Дослідження дало можливість показати негативний вплив асиметрії напруги, несинусоїдальних спотворень і відхилень напруги на роботу обладнання електричної підстанції. Розробка комплексних моделей і ефективних стратегій для зменшення означених проблем по якості електричної енергії має важливе значення для оптимізації роботи підстанції та забезпечення безперервної та ефективної роботи електричних мереж. Такі зусилля сприяють підвищенню загальної стійкості та надійності електричної інфраструктури перед різними технічними викликами у системах розподілу електроенергії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Романюк Ю.Ф. Електричні системи та мережі: навч. посібник / Ю.Ф. Романюк. – К.: Знання, 2007. – 292 с.
2. Кирик В. В. Електричні мережі та системи: підручник для здобувачів ступеня бакалавра спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / В.В. Кирик, КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: Політехніка, 2021. – 324 с.
3. Півняк Г.Г., Шидловський А.К., Кігель Г.А., Рибалко А.Я., Хованська О.І. Особливі режими електричних мереж. – Дніпропетровськ: НГА України, 2004. – 375 с.
4. ДСТУ ІЕС/TR 61000-1-2:2008. Національний стандарт України «Електромагнітна сумісність» Частина 1-2. Загальні положення. Методологія досягнення функціональної безпечності електричного та електронного обладнання стосовно електромагнітних явищ (ІЕС/TR 61000-1-2:2001, IDT).
5. Жежеленко І.В., Рабінович М.Л., Божко В.М. Якість електричної енергії на промислових підприємствах. – К.: Техніка, 1981. – 157 с.
6. Бурбело М.Й. Електромагнітна сумісність і керування якістю електроенергії в системах електропостачання: електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / Бурбело М.Й. – Вінниця: ВНТУ, 2023. – 159 с.
7. Олійник Ю.С. Якість електричної енергії / Ю.С. Олійник // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2018. – Вип. 196. – с. 113-115.
8. Бардик Є.І. Електрична частина станцій та підстанцій. Основне електрообладнання / Є.І. Бардик, М.П. Лукаш / К.: «Політехніка» НТУУ «КПІ» 2012. – 250 с.

9. Бялобржеський О.В. Контроль і керування якістю електричної енергії // Бялобржеський О.В., Сухоніс Т.Ю., Качалка В.Ю. – Кременчук, 2014. – 127 с.

10. Автоматизовані системи обліку та якості електричної енергії / Монографія / Праховник А.В., Тесик Ю.Ф., Жаркін А.Ф., Новський В.О., Гриб О.Г, Калінчик В.П., Карасінський О.Л., Довгалюк О.М., Лазуренко О.П., Ходаківський А.М., Васильченко В.І., Светелік О.Д. Харків: ПП «Ранок-НТ», 2012. – 516 с.

11. Кігель Г.А. Електричні мережі систем електропостачання: навч. посібник/ Г.А. Кігель, Г.Г. Півняк. – 2-ге вид., перероб. і доп. Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 318 с.

12. Костишин В. С. Електрична частина станцій та підстанцій : навч. посіб. / В.С. Костишин, М.Й. Федорів, Я.В. Бацала. – Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2017. – 243 с.

13. Vlahinić S., Brnobić D., Vučetić D. Measurement and analysis of harmonic distortion in power distribution systems. Electric Power Systems Research, 2009 – 79(7), p.p. 1121–1126. doi:10.1016/j.epsr.2009.02.004.

14. Beltran-Carbajal F., Silva-Navarro G. A fast parametric estimation approach of signals with multiple frequency harmonics. Electric Power Systems Research, 2017, 144, p.p. 157–162. doi:10.1016/j.epsr.2016.11.023.

15. Czarnecki L.S. Considerations on the Reactive Power in Nonsinusoidal Situations. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1985, IM-34(3), p.p. 399–404. doi:10.1109/tim.1985.4315358.

16. Morva G., Volokhin V., Diahovchenko I., Conka Z. Analysis of the impact of nonlinear distortion in voltage and current curves on the errors of electric energy metering devices. 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). doi:10.1109/ukrcon.2017.8100296.

17. Fernando M., Claudio R., Santiago L. Power Quality Measurement Under Non-Sinusoidal Condition. Power Quality, Monitoring, Analysis and Enhancement, 2011. doi:10.5772/16580.

18. IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions (n.d.). doi:10.1109/ieeestd.2010.5439063.

19. Rawa M.J.H., Thomas D.W.P., Sumner M. Simulation of non-linear loads for harmonic studies. 11th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, 2011. doi:10.1109/epqu.2011.6128915.

20. Elmoudi A., Lehtonen M., Nordman H. (n.d.). Effect of Harmonics on Transformers Loss of life. Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. doi:10.1109/elinsl.2006.1665344.

21. Ruiz-Cortés M., Milanés-Montero M. I., Barrero-González F., Romero-Cadaval E. Analysis of Causes and Effects of Harmonic Distortion in Electric Power Systems and Solutions to Comply with International Standards Regarding Power Quality. Technological Innovation for Cloud-Based Engineering Systems, 2015. p.p. 357–364. doi:10.1007/978-3-319-16766-4_38.

22. Філянін Д.В., Волошко А.В. Аналіз методів визначення джерел гармонічних спотворень в електричній мережі. ISSN 1813-5420 (Print). Енергетика: економіка, технології, екологія. 2020. № 1, с. 29–38.

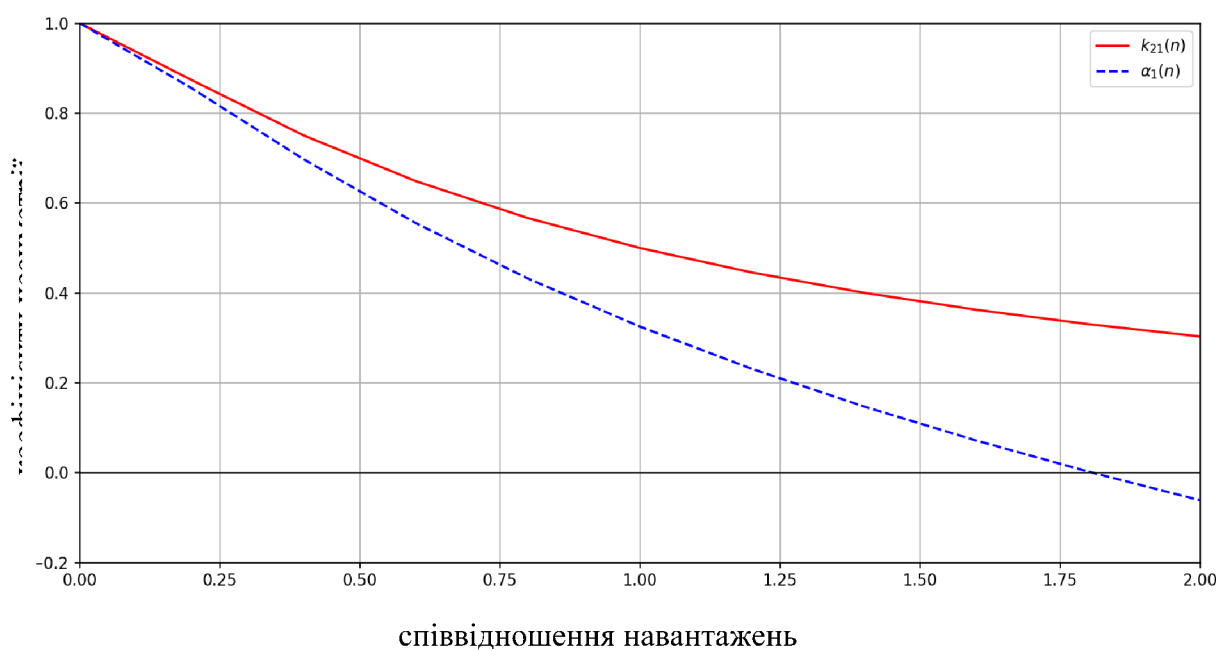
23. Лежнюк П.Д. Проектування електричної частини електричних станцій: навчальний посібник / П.Д. Лежнюк, В.М. Лагутін, В.В. Тепля. – Вінниця: ВНТУ, 2009. – 194 с.

24. Сегеда М.С. Електричні мережі та системи: Підручник / М.С. Сегеда. – Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.

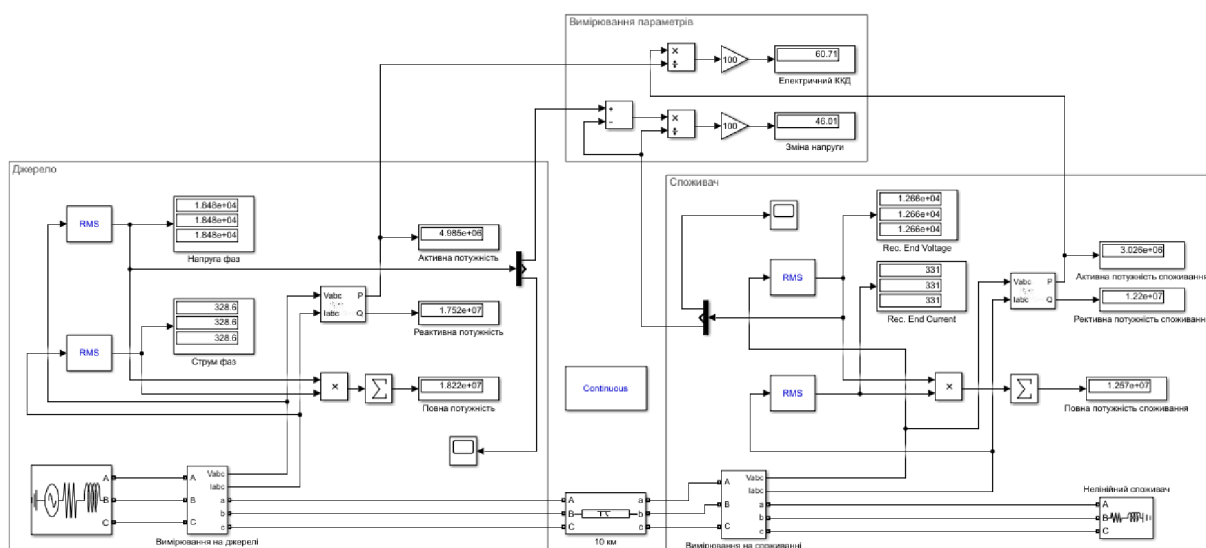
25. Комп'ютерне моделювання систем та процесів. Методи обчислень: навч. посіб. / Р. Н. Кветний та ін.; Вінниц. нац. техн. ун-т. Вінниця: ВНТУ, 2013.

26. S.J. Chapman. MATLAB Programming for Engineers. Thomson, 2004. – 592 p.
27. Махней О.В. Математичне моделювання: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Супрун В.П., 2015. – 372 с.
28. ДСТУ 13109-97 Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. – Україна, 2012.
29. Електричне обладнання підстанцій систем електропостачання / [Орлович А.Ю., Плешков П.Г., Козловський О.А., Співак О.В., Котиш А.І., Величко Т.В.]; М-во освіти і науки України, Центральноукр. нац. техн. ун-т. – Кропивницький: Видавець Лисенко В.Ф., 2019. – 272 с.
30. ДСТУ-Н Б В.2.5-80:2015 Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. Київ: Мінрегіон, 2016. – 79 с.

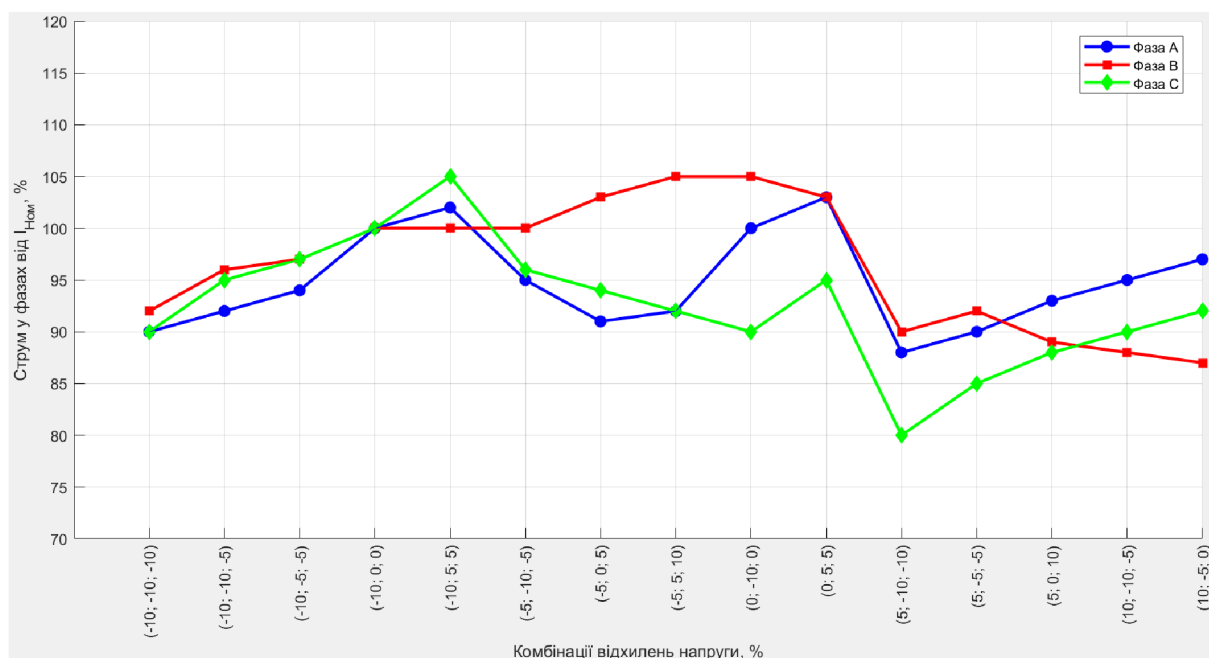
ДОДАТОК А. ГРАФІЧНА ЧАСТИНА



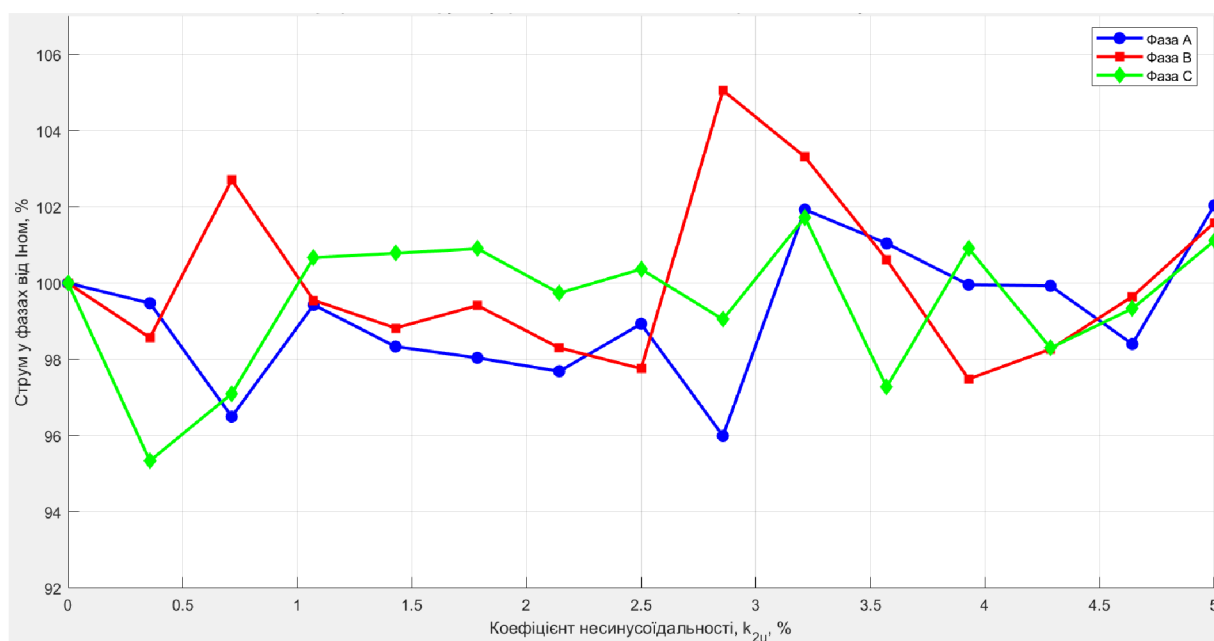
Залежність коефіцієнтів асиметрії струму від співвідношень навантажень



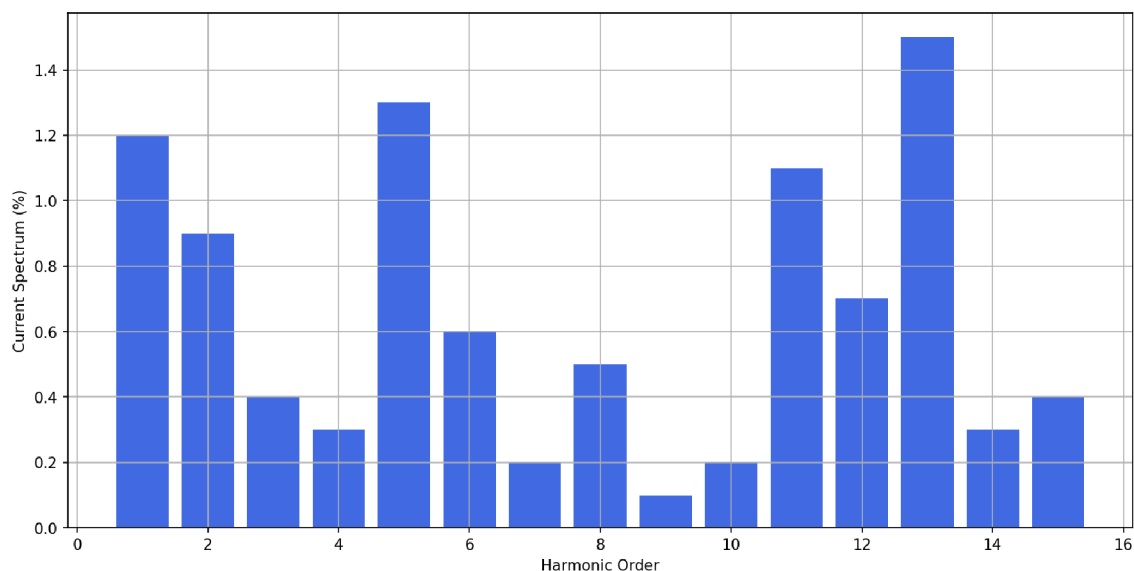
Модель для аналізу характеристик трифазної електричної системи



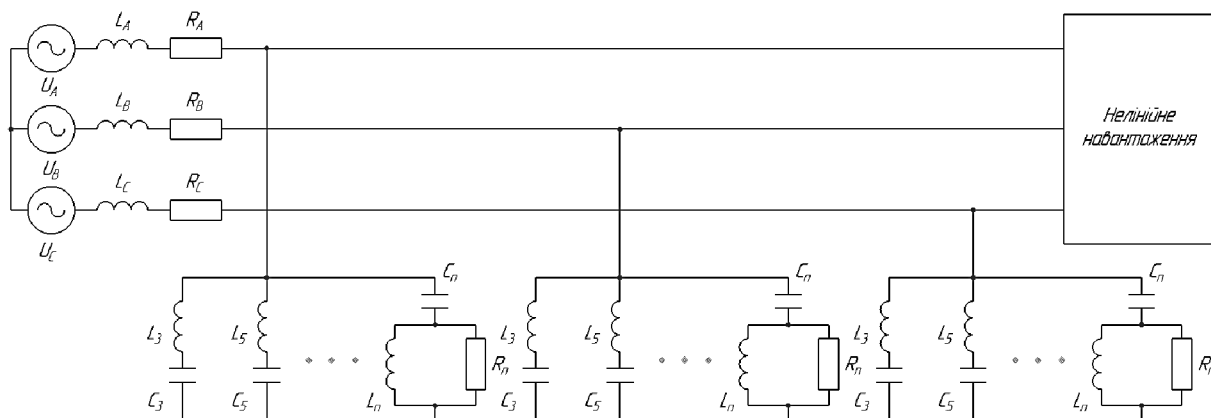
Графік зміни струмів у відношенні від відхилення фазних напруг



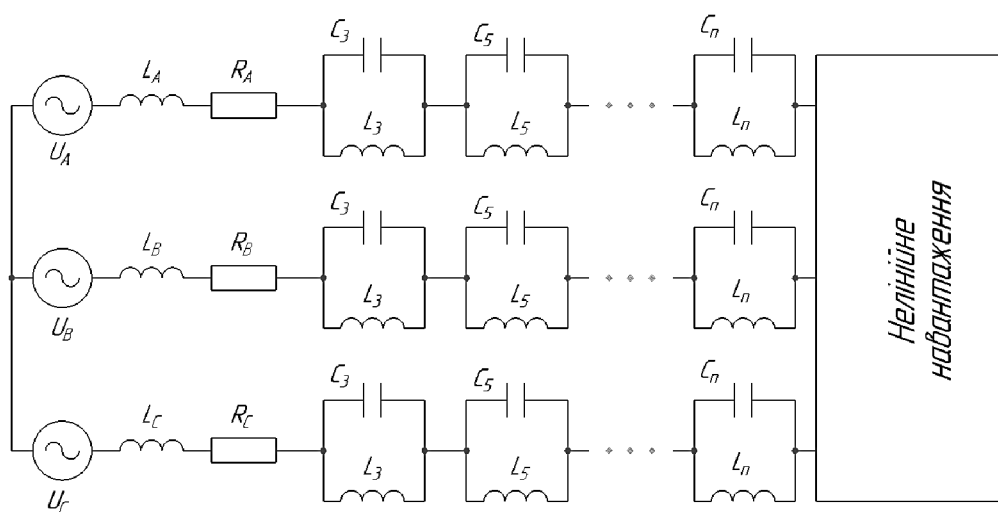
Графік зміни струмів у фазах залежно від коефіцієнта несинусоїдальності



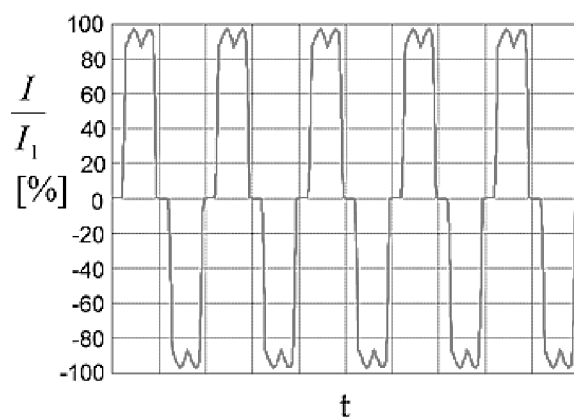
Розподіл струмів окремих гармонік



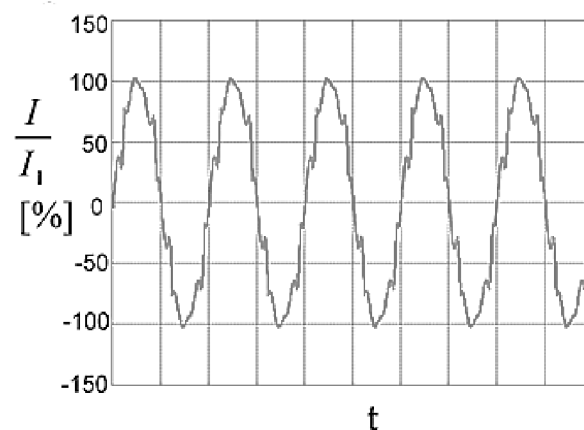
Ввімкнення групи паралельних пасивних фільтрів у трифазній мережі



Ввімкнення групи послідовних пасивних фільтрів у трифазній мережі

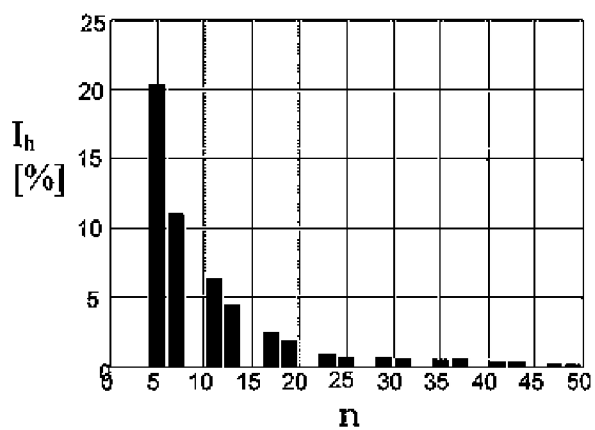


a)

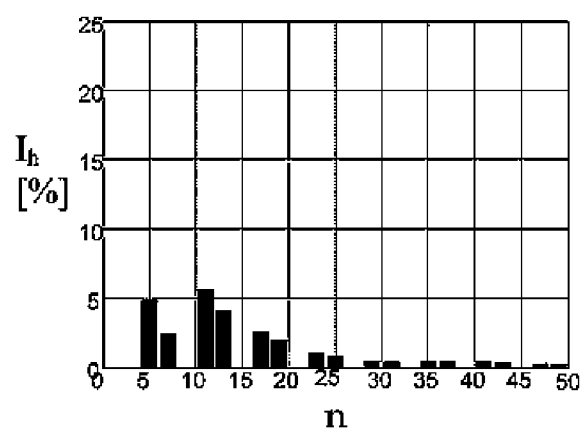


б)

Осцилограми струму до (а) та після (б) підключення фільтрів



a)



б)

Спектри струму (а) та після (б) підключення фільтрів

ДОДАТОК Б

Перелік зауважень нормоконтролера до дипломної роботи

Позначення документа	Документ	Умовне позначення	Зміст зауваження

Дата _____