

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

Інститут енергозбереження та енергоменеджменту _____
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання _____
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

**зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»**

спеціалізації Системи забезпечення споживачів електричною енергією

**на тему: «Комплексна оцінка асиметрії напруги в електричній мережі та
методи її усунення»**

Виконав: студент II курсу, групи ОЕ-91мп

_____ Лисий Владислав Васильович _____
(прізвище, ім'я по батькові) (підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Волошко Анатолій Васильович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Консультант нормоконтроль ас. Прокопенко І.Д. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

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

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних
посилань.

Студент _____

Київ – 2020 року

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

Інститут/факультет Інститут енергозбереження та енергоменеджменту
Кафедра електропостачання

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Системи забезпечення споживачів електричною енергією»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ В.А. Попов

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Лисий Владислав Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Комплексна оцінка асиметрії напруги в електричній мережі та методи її усунення»

науковий керівник дисертації д.т.н., доц. Волошко Анатолій Васильович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «03» листопада 2020 р. №3199-с

2. Строк подання студентом дисертації 14 грудня 2020 року

3. Об'єкт дослідження процеси визначення режимів електроспоживання в системах електропостачання

4. Предмет дослідження вплив асиметрії, гармонік, інтегармонік та парних гармонік на роботу споживачів електричної енергії

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

а) аналіз існуючої енергетичної системи України та її стану

б) аналіз впливу фактора асиметрії на ефективність роботи системи електроспоживання;

в) -Аналіз та систематизація методів визначення наявності парних гармонійних складових відповідно до інтернаціональних та вітчизняних нормативно-правових актів

г) - Оцінювання та аналіз гармонійних показників в електричній мережі;

г) - озробка способу оцінювання та вимірювання гармонійних груп та підгруп, а також фактору асиметрії

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: блок-схеми розроблених алгоритмів, графіки електричних навантажень, діаграми, презентаційний матеріал

7. Орієнтовний перелік публікацій

а) Лисий В. В., Системи моніторингу електричних мереж 110 КВ та вище і їх програмування / Збірник наукових праць науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 2020. – (Київ, 7 травня 2020 рік) - С.105-109;

б) Лисий В.В., Комплексна оцінка асиметрії напруги в електричній мережі та методи її усунення/ Збірник наукових праць науково-технічної конференції «Сталий розвиток енергетики. Сучасні системи забезпечення електричною енергією», 2020. – (Київ, 27 листопада 2020 рік) - С.180-186

8. Дата видачі завдання 29. 05. 2020 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Отримання завдання	29.05.20	Виконано
2	Аналіз літературних джерел	1.06.20-31.08.20	Виконано
3	Робота над першим розділом	1.09.20-14.09.20	Виконано
4	Робота над другим розділом	15.09.20-30.09.20	Виконано
5	Робота над третім розділом	1.10.20-13.10.20	Виконано
6.	Розробка стартап проекту	14.10.20-29.10.20	Виконано
7.	Оформлення дисертації	30.10.20-3.11.20	Виконано
8.	Оформлення реферату і презентації, перевірка на плагіат та рецензування	30. 10.20-10.12.20	Виконано
9.	Перед захист МД	10.12.20-14.12.20	Виконано
10.	Захист дисертації	17.12.20-22.12.20	Виконано

Студент

(підпис)

В.В. Лисий
(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

А.В. Волошко
(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи: дисертація викладена на 116 сторінках, складається з вступу, 4 розділів, висновків, уміщує 46 рисунків, 10 таблиць, список використаних джерел із 36 найменувань на 4 сторінках.

Актуальність теми: пов'язана з проблемою якості електроенергії у системах електропостачання промислових підприємств, що визначає надійність та ефективність електропостачання споживачів.

Мета та завдання дослідження: Метою дослідження в даній дисертації є знаходження способу підвищення ефективності та точності комплексного оцінювання впливу асиметричної напруги в мережі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити низку завдань:

- проаналізувати існуючу енергетичної системи та її стану;
- Проаналізувати вплив фактора асиметрії на ефективність роботи системи електроспоживання;
- Проаналізувати та методи визначення наявності парних гармонійних складових відповідно до інтернаціональних та вітчизняних нормативно-правових актів.
- Провести оцінку та аналіз гармонійних показників в електричній мережі;
- Розробити способи оцінювання та вимірювання гармонійних груп та підгруп, а також фактору асиметрії.

Об'єктом дослідження є процеси визначення режимів електроспоживання в системах електропостачання України.

Предметом дослідження є методи та засоби опису режимів електроспоживання, а також вплив асиметрії, гармонік, інтергармонік та парних гармонік на роботу споживачів електричної енергії.

Методи дослідження. Методичною основою дисертаційного дослідження є комплекс загальнонаукових та спеціальних методів, а саме методи Вейвлет-аналізу, метод аналізу Фур'є, а також математичне моделювання та математичне програмування.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Розроблена методика опису асиметрії напруги та гармонік, що виникають в електричній мережі;
2. Розроблено методику визначення показника асиметрії;
3. Розроблено програмне забезпечення на основі аналізу Фур'є, побудоване за допомогою Python 3 та бібліотек Matplotlib.

Практичне значення одержаних результатів:

Отримані в роботі наукові результати мають практичне значення для покращення якості електричної енергії, що в свою чергу здатне вплинути на надійність та ефективність електропостачання споживачів і роботу енергетичної системи в цілому

Апробація

1. Науково-технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (Київ, 7 травня 2020 рік);
2. Науково-технічна конференції «Сталий розвиток енергетики. Сучасні системи забезпечення електричною енергією», (Київ, 27 листопада 2020 рік).

Публікації

1. Лисий В. В., Системи моніторингу електричних мереж 110 КВ та вище і їх програмування / Збірник наукових праць науково-технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 2020. – (Київ, 7 травня 2020 рік) - С.105-109;
2. Лисий В.В., Комплексна оцінка асиметрії напруги в електричній мережі та методи її усунення/ Збірник наукових праць науково-технічної конференції «Сталий розвиток енергетики. Сучасні системи забезпечення електричною енергією», 2020. – (Київ, 27 листопада 2020 рік) - С.180-186

Ключові слова: ІНТЕРГАРМОНІКИ, СУБГАРМОНІКИ, ПАРНІ ГАРМОНІКИ, ВИЩІ ГАРМОНІКИ, ФУР'Є-АНАЛІЗ, ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ, ШВИДКЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є, ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ, АСИМЕТРІЯ НАПРУГИ.

ABSTRACT

Structure and scope of work: the dissertation is stated on 116 pages, consists of the introduction, 4 sections, conclusions, contains 46 figures, 10 tables, the list of the used sources From 36 names on 4 pages.

Relevance of the topic: associated with the problem of electricity quality in the power supply systems of industrial enterprises, which determines the reliability and efficiency of electricity supply to consumers.

Aim and objectives of the study: The aim of the research in this dissertation is to find a way to increase the efficiency and accuracy of a comprehensive assessment of the impact of asymmetric voltage in the network.

To achieve this goal it is necessary to solve a number of tasks:

- analyze the existing energy system and its condition;
- To analyze the influence of the asymmetry factor on the efficiency of the power consumption system;
- Analyze the methods of determining the presence of paired harmonic components in accordance with international and domestic regulations.
- Assess and analyze the harmonics of the electrical network;
- Develop methods for estimating and measuring harmonic groups and subgroups, as well as asymmetry factors.

Object of research: The object of research is the processes of determining the modes of electricity consumption in the power supply systems of Ukraine.

Subject of research: methods and means of describing power consumption modes, as well as the influence of asymmetry, harmonics, interharmonics and pair harmonics on the work of electricity consumers.

Research methods: The methodological basis of the dissertation research is a set of general scientific and special methods, namely Wavelet analysis methods, Fourier analysis method, as well as mathematical modeling and mathematical programming.

Scientific novelty of the obtained results:

1. The technique of the description of asymmetry of tension and harmonics arising in an electric network is developed;
2. A method for determining the asymmetry index has been developed;
3. Developed software based on Fourier analysis, built using Python 3 and Matplotlib libraries.

The practical significance of the obtained results

The scientific results obtained in this work are of practical importance for improving the quality of electricity, which in turn can affect the reliability and efficiency of electricity supply to consumers and the operation of the energy system as a whole.

Approbation

1. Scientific and technical conference "Energy. Ecology. Man », (Kyiv, May 7, 2020);
2. Scientific and technical conference "Sustainable energy development. Modern power supply systems ", (Kyiv, November 27, 2020).

Publications

1. Lysyi VV, Monitoring systems for electric networks of 110 kV and above and their programming / Proceedings of the scientific and technical conference "Energy. Ecology. Man ", 2020. - (Kyiv, May 7, 2020) - P.105-109;
2. Lysyi VV, Complex assessment of voltage asymmetry in the electrical network and methods of its elimination / Proceedings of the scientific and technical conference "Sustainable energy development. Modern power supply systems ", 2020. - (Kyiv, November 27, 2020) - P.180-186

Keywords: INTERHARMONICS, SUBHARMONICS, PAIRED HARMONICS, HIGHER HARMONICS, FOURIER-ANALYSIS, WAVELET TRANSFORMATION, FOURIE FAST TRANSFORMATION

ЗМІСТ

Перелік скорочень	10
Вступ.....	11
Розділ 1 Відомості про асиметрію в електричній мережі та загальна Оцінка якості електричної мережі.....	15
1.1. Якість електричної енергії.....	15
1.1.1. Основні параметри що визначають якість електроенергії.....	15
1.1.2. Оцінка якості електричної енергії	21
1.1.2.1. Нормування окремих показників якості електричної енергії.....	21
1.1.2.2. Нормування показників якості електроенергії в електричних мережах низької та середньої напруги	23
1.1.2.3. Нормування показників якості електроенергії в електричних мережах високої напруги	25
1.1.2.4. Обчислення допустимого рівня гармонійних складових за прийнятним значенням показників якості електроенергії.....	26
1.1.2.5. Оцінка ступеня невизначеності показників якості електричної енергії	29
1.2. Базові характеристики асиметрії напруги.....	30
1.3. Основні причини виникнення асиметрії	32
1.4. Особливості аналізу інтергармонік та їх вплив на ефективність електричних мереж	34
1.5. Проблеми визначення інтергармонік	56
1.6. Парні гармоніки й фактор асиметрії.....	58
Висновки до розділу	61
Розділ 2 методи аналізу спотворень в електричній мережі	63
2.1. Постановка питання.....	63
2.2. Основи вейвлет-аналізу	66
2.2.1. Головні ознаки вейвлет-функцій.....	67
2.2.2. Неперервне Вейвлет-перетворення.....	68
2.3. Метод перетворення Фур'є	70
2.4. Порівняння наявних методів аналізу спотворень сигналу напруги	74
2.5. Методологічне проведення гармонійного аналізу при використанні вейвлет-перетворень	80

Висновки до розділу	83
Розділ 3 вимірювання та аналіз гармонічних спотворень	84
3.1. Гармонійні та інтергармонійні групи та підгрупи за формами напруги та струму	84
3.2. Програмна реалізація вимірювання та моніторингу гармонічних спотворень за допомогою аналізу Фур'є на Python 3 та Matplotlib	85
3.3. Вимірювання гармонічних спотворень	92
Висновки до розділу	100
Розділ 4 Розроблення стартап-проєкту	101
4.1. Опис ідеї	101
4.2. Технологічний аудит проєкту	102
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проєкту	103
4.4 Розроблення ринкової стратегії проєкту	105
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проєкту	108
Висновки до розділу	110
Висновки	111
Перелік використаних джерел	113

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ОЕС – об'єднана енергетична система

ЯЕ – якість електричної енергії

ФА – фактор асиметрії

АД – асинхронний двигун

ВГ – вищі гармоніки

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика

ДПФ – дискретне перетворення Фур'є

ПДПФ – пряме дискретне перетворення Фур'є

ЗДПФ – зворотне дискретне перетворення Фур'є

ВДПФ – віконне дискретне перетворення Фур'є

SWOT-аналіз - аналіз сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities)

ВСТУП

Електрична енергія використовується практично у всіх процесах, пов'язаних з діяльністю людини. Володіючи специфічними властивостями, електроенергія безпосередньо бере участь при створенні інших видів енергії та продукції, впливаючи на їх якість.

Поняття якості електричної енергії відрізняється від поняття якості інших видів продукції. Кожен електричний пристрій, призначений для роботи при певних параметрах та умовах експлуатації, повинен відповідати сукупності параметрів, таких як номінальна частота, напруга, коефіцієнт форми кривої напруги, тощо.

Погіршення якості електроенергії, інакше кажучи, збільшення рівня електромагнітної сумісності у системі електропостачання обумовлено технологічним процесом виробництва, передачею, розподілом та споживанням електроенергії.

Асиметрія напруги має прямий вплив на якість електричної енергії в мережі, оскільки асиметричне навантаження мережі впливає на ряд показників пов'язаних з роботою електроприймачів цієї мережі.

Проблема асиметрії напруги в електричній мережі стає все більш актуальною, що може бути пов'язано з неперервним впровадженням нових потужностей в промисловості, використанню нових технологій, утворення нової генерації та її під'єднання до об'єднаної енергетичної системи України.

По мірі розвитку енергетики та широкого застосування різних електротехнічних засобів, характер споживання поступово змінюється: воно стає несиметричним, невірноваженим та включає вищі гармоніки.

Проблема наявності вищих гармонік напруги $u(t)$ та струму $i(t)$ в електричній мережі, усунення їх негативного впливу є актуальною і потребує розв'язання.

В сучасних умовах забезпечення обліку електроенергії недостатньо враховує процеси, що відбуваються в електричних мережах та недостатньо уваги приділяє асиметричним складовим напруги.

Актуальність теми

Актуальність теми щодо аналізу гармонійних складових у системі електричних мереж, пов'язана з проблемою якості електроенергії у системах електропостачання промислових підприємств, протягом достатньо тривалого часу залишається однією з найважливіших проблем, що визначає надійність та ефективність електропостачання споживачів. Ця проблема має декілька складових, однією з яких є проблема виникнення гармонійних складових та асиметрії.

Парна частина складових гармонік створює асиметрію між додатньою та від'ємною півхвилями сигналів напруги або струму. Парні гармонійні струми, що під час протікання причинюють появу парних гармонік в сигналі напруги, з'являються в мережі через нелінійні навантаження з асиметричними вольтамперними характеристиками. Прикладом асиметричного навантаження можуть бути випрямлячі, перетворювачі, дугові печі або будь-які електричні пристрої.

Варто звернути увагу, що парні гармоніки спричинюють досить значний негативний вплив на навантаження системи. Інтернаціональні енергетичні стандарти диктують строгі обмеження на парні складові гармонік, проте вітчизняні стандарти взагалі не регламентують показники парних гармонік.

По цій причині варто розглянути дану тему, оскільки для сучасних енергетичних систем вона є актуальною, так як допоможе зрозуміти процес впливу асиметричних складових на роботу мережі.

Мета й завдання дослідження

Метою дослідження в даній дисертації є знаходження способу підвищення ефективності та точності комплексного оцінювання впливу асиметричної напруги в мережі, що дозволять більш повно оцінити процес та вимірювати параметри електромагнітних процесів в системах з метою підвищення ефективності роботи систем. Також, було розглянуто можливі шляхи усунення негативного впливу асиметрії напруги на роботу електричної мережі.

Для досягнення даної мети необхідно вирішити наступні завдання:

- Аналіз існуючої енергетичної системи та її стану;
- Аналіз впливу фактора асиметрії на ефективність роботи системи електроспоживання;
- Аналіз та систематизація методів визначення наявності парних гармонійних складових відповідно до інтернаціональних та вітчизняних нормативно-правових актів.
- Оцінювання та аналіз гармонійних показників в електричній мережі;
- Розробка способу оцінювання та вимірювання гармонійних груп та підгруп, а також фактору асиметрії.

Об'єктом дослідження є процеси визначення режимів електроспоживання в системах електропостачання України.

Предметом дослідження є методи та засоби опису режимів електроспоживання, а також вплив асиметрії, гармонік, інтергармонік та парних гармонік на роботу споживачів електричної енергії.

Методи дослідження. Методичною основою дисертаційного дослідження є комплекс загальнонаукових та спеціальних методів, а саме методи Вейвлет-аналізу, метод аналізу Фур'є, а також математичне моделювання та математичне програмування.

Наукова новизна одержаних результатів

- Розроблена методика опису асиметрії напруги та гармонік, що виникають в електричній мережі, що дозволить підвищити точність проведення гармонійного аналізу у випадку появи нелінійних спотворень в електричній мережі.
- Розроблено методику визначення показника асиметрії на основі обчислення середньоквадратичних значень позитивних та негативних півциклів сигналу що дозволяє проводити моніторинг наявності асиметрії в системах електропостачання в реальному часі

- Розроблено програмне забезпечення на основі аналізу Фур'є, побудоване за допомогою Python 3 та бібліотек Matplotlib для оцінювання гармонік, спектрального аналізу та синтезу для отримання коливань складної форми, а також фільтрації аналогових сигналів та вимірювання гармонік та асиметрій у формі сигналу напруги.

Практичне значення одержаних результатів:

- проведено системний аналіз впливу асиметрії напруги на роботу електричної мережі;
- проаналізовано можливі способи усунення негативного ефекту від асиметрії напруги в електричній мережі;
- на основі аналізу Фур'є проведено дослід, що дозволить підвищити точність гармонійного аналізу асиметрії напруги в електричній мережі;
- на основі розробленого способу проведено дослід, що дозволить визначити показники асиметрії та групу повних гармонійних спотворень першого та другого порядку.

РОЗДІЛ 1 ВІДОМОСТІ ПРО АСИМЕТРІЮ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ ТА ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

1.1. Якість електричної енергії

Якість електричної енергії - це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначення. [1]

Оцінка якості електричної енергії має важливе місце в забезпеченні взаємодії систем електропостачання та споживачів електроенергії. Зростання кількості споживачів що мають нелінійне та асиметричне навантаження вимагає розвитку методів та принципів визначенні електромагнітної сумісності в електромережах.

1.1.1. Основні параметри що визначають якість електроенергії

Існують наступні основні типи спотворень [2] в електромережі:

- вищі гармоніки, частота яких кратна основній частоті;
- інтергармоніки – гармоніки, частота яких не кратна основній частоті;
- коливання напруги;
- короткочасні падіння напруги, амплітуда яких перевищує 10 % і може досягати 100 %;
- несиметрія напруги у трифазних системах;
- сигнали систем управління, що передаються лініями електропередач;
- зміна частоти;
- перетворювачі постійного струму.

Для дослідження якості електричної енергії є необхідність контролювати наступні параметри [3]:

1. δU_y - встановлене відхилення напруги;
2. δU_t - розмах зміни напруги;
3. P_t - доза флікера;
4. K_U - коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги ;
5. $K_{U(n)}$ - коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги;
6. K_{2U} - коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю;

7. K_{0U} - коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю;
8. Δ_f - відхилення частоти;
9. Δt_{Π} - тривалість провалу напруги;
10. $U_{\text{імп}}$ - імпульсна напруга;
11. $K_{\text{пер } U}$ - коефіцієнт тимчасової перенапруги.

Також, є допоміжні параметри електричної енергії, які використовуються при визначенні значень деяких показників якості електричної енергії:

1. $F\delta U_t$ - частота повторення змін напруги;
2. $\Delta t_{i,i+1}$ - інтервал між змінами напруги;
3. δU_{Π} - глибина провалу напруги;
4. $F_{\text{пер } U}$ - частота виникнення провалів напруги;
5. $\Delta t_{\text{імп } 0,5}$ - тривалість імпульсу за рівнем 0,5 його амплітуди;
6. $\Delta t_{\text{пер } U}$ - тривалість тимчасового перенапруження.

Основні параметри якості електроенергії за джерелом впливу поділяють на три наступні групи [3].

До першої групи належать відхилення частоти Δ_f і встановлене відхилення напруги δU_y . Ці показники не залежать від окремих електроприймачів на підприємстві чи в побуті через невелику потужність. Основний вплив на значення цих параметрів надає сумарна потужність генераторів електростанцій енергосистеми вцілому.

До другої групи належать параметри якості електроенергії джерелами викривлень яких є окремі споживачі електроенергії. До цих параметрів відносяться коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U , коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги, коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{0U} , коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю, розмах зміни напруги δU_t та доза флікера P_t , які характеризують несинусоїдальність форми кривої напруги, несиметрію та коливання напруги [3].

До третьої групи належать показники якості електричної енергії, що характеризують випадкові електромагнітні явища й електротехнологічні процеси в системі електропостачання. Вони охоплюють тривалість провалу напруги $\Delta t_{\text{п}}$, імпульсна напруга $U_{\text{імп}}$ та коефіцієнт тимчасової перенапруги $K_{\text{пер } U}$, які виникають у більшості випадків у результаті комутацій або розрядів блискавки в лінію електропередач.

Кожний з цих показників характеризує певну властивість електричної енергії.

Надалі розглянемо які властивості мають показники електричної енергії.

Відхилення напруги

Відхилення напруги визначається різницею між дійсним U і номінальним значенням напруги $U_{\text{ном}}$. У якості дійсного значення напруги U у трифазних мережах можна приймати напругу прямої послідовності основної частоти [4].

Параметрами якості електроенергії, що характеризують відхилення напруги є встановлене відхилення напруги $\delta U_{\text{у}}$, для якого за [2] встановлені наступні норми:

- нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги на виводах приймачів електричної енергії дорівнюють відповідно ± 5 і $20 \pm 10\%$ від номінальної напруги електричної мережі за ДСТУ 721 і ДСТУ 21128 (Номінальна напруга);

- нормально допустимі і гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги в точках загального приєднання споживачів електричної енергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ та вище повинні бути встановлені в договорах на користування електричною енергією між енергопостачальною організацією та споживачем з урахуванням необхідності виконання норм цього стандарту на виводах приймачів електричної енергії. Для визначення нормально допустимих і гранично допустимих значень використовують відповідні нормативні документи, які затверджені в установленому порядку [1].

Основними причинами виходу даного показника за межі норми є:

- технологічні зміни струмового навантаження за добу чи сезон;
- зміна потужності компенсуючих приладів і генераторів;
- зміна параметрів і схеми електричної мережі. Через зазначені фактори

виникає відхилення напруги, яке значно впливає на роботу електродвигунів. Перш за все це викликає перегрів ізоляції викликане зниженням напруги на затискачах двигуна через що зменшується реактивна потужність намагнічування, і при тій же споживаній потужності зростає струм двигуна. Через збільшення реактивної потужності в наслідок збільшення напруги на виводах двигуна, виникає необхідність її компенсації [5].

Коливання напруги

До коливань відносять швидкі зміни діючого значення напруги, що відбуваються зі швидкістю 1-2% в секунду і більше [4], і характеризуються наступними показниками якості електроенергії:

- розмах зміни напруги δU_t ;
- доза флікера P_t .

При різких змінах струмового навантаження відбувається настільки ж різка зміна еквівалентних параметрів ЕП, в результаті чого має місце модуляція в часі амплітуд і фаз вимушених складових миттєвого струму як основний, так і кратних їй вищих несучих частот. У деяких випадках можливе також поява вільних складових.

Все це природним чином призводить до збільшення сумарних активних втрат в мережі. Найбільш чутливими до коливань напруги є освітлювальні прилади і електронна техніка. Через коливання напруги виникає миготіння ламп розжарювання [6].

Основними причинами коливань напруги є використання електроприймачів зі швидкозмінними режимами роботи, що супроводжується різкими змінами потужності (головним чином реактивної) навантаження, і виникають частіше за все у таких електроприймачів як: тягові підстанції,

приводи реверсивних прокатних станів, дугові сталеплавильні печі, зварювальні апарати, електролізні установки.

Несинусоїдальність напруги

Вона характеризується за [1] наступними показниками:

- коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U ;
- коефіцієнт n-ої гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$.

Основними причинами зміни показників є використання нелінійних електроприймачів. Це такі прилади як: вентиляльні перетворювачі, силове електрообладнання з тиристорним управлінням, дугові й індукційні електропечі, люмінесцентні лампи, установки дугового і контактного зварювання, перетворювачі частоти а також побутова техніка. Ці пристрої під час роботи створюють потік вищих гармонік, які потрапляють у зовнішню мережу. Загалом це призводить до додаткових втрат [6].

Несиметрія напруг

Несиметрії напруг характеризується наступними показниками:

- коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю K_{2U} ;
- коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю K_{0U} .

За [1] нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за зворотною послідовністю в точках загального приєднання до електричних мереж рівні 2,0 і 4,0% відповідно.

Нормально допустиме і гранично допустиме значення коефіцієнта несиметрії напруг за нульовою послідовності в точках загального приєднання до чотирьох провідних електричних мереж з номінальною напругою 0,38 кВ рівні 2,0 і 4,0% відповідно [1].

Основними причинами виходу цих показників за нормальні значення є використання несиметричних або однофазних електроприймачів, це: дугові сталеплавильний печі, тягові навантаження залізниць на змінних струмі, електрозварювальні агрегати, освітлювальні установки, однофазне комунальнопобутові навантаження.

Погіршення умови роботи електроприймачів і взагалі всіх елементів мережі виникає через несиметрію струму навантаження, який протікає у елементах системи електропостачання, викликаючи в них несиметричне падіння напруги. Внаслідок цього на виводах ЕП з'являється несиметрична система напруг.

Відхилення частоти

Відхилення частоти напруги змінного струму в електричних мережах характеризується показником відхилення частоти Δ_f , для якого встановлено такі норми:

- нормально допустиме значення відхилення частоти рівні на $\pm 0,2$ Гц;
- гранично допустиме значення відхилення частоти рівні на $\pm 0,4$ Гц.

Причина виходу показника за межі норм полягає в зміні величин генерується і споживаної потужності в енергосистемі [1].

Провал напруги

Провал напруги характеризується показником тривалості провалу напруги, для якого за [1] встановлена наступна норма:

- гранично допустиме значення тривалості провалу напруги в електричних мережах напругою до 20 кВ включно дорівнює 30 с. Тривалість автоматично усуваного провалу напруги в будь-якій точці приєднання до електричних мереж визначається витримки часу релейного захисту та автоматики.

Імпульс напруги

Імпульс напруги [1] характеризується показником імпульсної напруги $U_{\text{імп}}$.

Значення імпульсних напруг для грозових і комутаційних імпульсів, що виникають в електричних мережах енергопостачальної організації.

Тимчасове перенапруження

Тимчасове перенапруження [1] характеризується показником коефіцієнта тимчасової перенапруги $K_{\text{пер } U}$. Останні три показники можливо віднести до характеристик різних електромагнітних перехідних перешкод, що

виникають при електромагнітних перехідних процесах, які мають місце в електричних мережах в результаті виникнення різних видів коротких замикань, ударів блискавок в елементи мережі, дій систем релейного захисту і автоматики, комутацій різного електроустаткування, обривів нульового проводу в мережах 0,4 кВ. Крім цього провали наружи зумовлюються людським фактором і помилковими спрацьовуваннями засобів захисту і автоматики [8].

1.1.2. Оцінка якості електричної енергії

Відповідно до [7] якість електричної енергії характеризується сукупністю певних показників, для яких встановлено допустимі рівні, в межах яких відбувається нормальне функціонування споживачів електроенергії. Проте нормування окремих показників відбувається при умові що на даний момент має місце лише один вид порушень якості електроенергії. Тобто, одночасна дія декількох факторів спотворення не розглядається.

Оцінка асиметрії та несинусоїдальності, що є джерелами спотворень для споживачів певних галузей заснована на встановленні допустимих рівнів цих окремих впливових факторів. Для асиметрії та несинусоїдальності це коефіцієнти несиметрії напруг за зворотньою послідовністю K_{2U} , несиметрії напруг за нульовою послідовністю K_{0U} , спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U , n -ї гармонійної складової напруги $K_{U(n)}$. Загальний недолік нормування стандарту полягає у тому що можливість розгляду одночасної дії цих спотворень.

1.1.2.1. Нормування окремих показників якості електричної енергії

У відповідності до (7) найбільші величини показників якості електроенергії не повинні виходити за значення, що є гранично допустимими, а величини показників якості, визначені з ймовірністю 95%, не повинні перевищувати нормально допустимих значень, приведених в таблиці 2.1. Мінімальний інтервал вимірювання при цьому дорівнює 24 год.

В стандартах (7) наведено такі ж рівні напруг гармонійних складових для низьковольтних електромереж. Загальний коефіцієнт гармонік також становить 8% за умов, що рівні окремих гармонійних складових не досягають рівнів, визначених регламентом, одночасно.

Такі ж самі норми задано стандартом (7) для електромагнітного оточення другого класу (промислове обладнання), тобто рівні сумісності такого класу ідентичні рівням сумісності мереж загального призначення. Чутливе до завад в мережах живлення обладнання належить до першого класу. Для такого обладнання коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги K_U не повинен перевищувати 5% і значення гармонійних складових напруги мають мати нижче значення.

Для третього класу (промислові мережі з великим навантаженням) рівні сумісностей наступні: K_U становить 10%, а коефіцієнт асиметрії зворотної послідовності 3%.

Таблиця 1.1 – Вимоги до якості електричної енергії

№	Показники	Допустимий рівень			
		нормальний			граничний
	K_U % для рівнів напруги:				
	0,38 кВ	8			12
	6/20 кВ	5			8
	35 кВ	4			6
	110/330 кВ	2			3
	$K_{U(n)}$ % для рівнів напруги:	n=5	n=3	n=2	$K_{гран} = 1,5 K_{норм}$
	0,38 кВ	6	5	2	
	6/20 кВ	4	3	1,5	
	35 кВ	3	3	1	
	110/330 кВ	1,5	1,5	0,5	

		Для складових з більшим номером норми зменшуються пропорційно номеру складника	
	$K_{2U} \%$	2	4
	$K_{0U} \%$	2	4

Щодо кумулятивної дії спотворень електричної енергії (7), зауважимо, що наявність напруги зворотної послідовності обумовлює виникнення нехарактерних гармонічних спотворень під час використання перетворювачів, а обмеження значень застосовується для запобігання одночасному існуванню декількох гармонійних складових, що мають велику амплітуду.

Нормальний режим роботи асинхронного двигуна (9 стар) можливий при постійно діючій асиметрії напруг з коефіцієнтом зворотної послідовності 2%. Проте у випадку коли напруга живлення двигуна містить складові вищих гармонік, це призводить до значного перегріву і пришвидшеного зношення ізоляції. Також, варто звернути увагу, що кількісний результат впливу залежить від складу гармонік напруги. Несинусоїдальні спотворення кривої напруги при однакових значеннях коефіцієнту несинусоїдальності та різному складі гармонік будуть призводити до втрат та нагрівання асинхронного двигуна (1,10) та іншого електротехнічного обладнання.

Нормування показників якості електроенергії дозволяє забезпечувати допустимі теплові режими роботи електричних машин при різних комбінаціях зворотної послідовності і гармонічних складових.

1.1.2.2. Нормування показників якості електроенергії в електричних мережах низької та середньої напруги

Показниками, що найбільше впливають на роботу електрообладнання і використовуються в більшості фучасних стандартів для оцінки якості електричної енергії, є напруга зворотної послідовності і вищі гармоніки. Тому саме з них доцільно сформуванати узагальнений показник ЯЕ. Найпростіший спосіб формування узагальнених показників (або комплексних показників) базується на наступному співвідношенні:

$$K^y = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_i x_i, (1.1)$$

де a_i – коефіцієнт ваги окремих показників, x_i – окремі відносні показники.

При побудові узагальненого показника треба враховувати відношення еквівалентності, порядку та адитивності між складовими співвідношення. Відношення порядку вимагає однієї направленості впливу складників. Відношення адитивності відповідає можливості пропорційного комбінування впливів відносних показників x_i .

Допустиме значення узагальненого показника якості електроенергії можна визначити по найбільш поширеному і водночас чутливому до асиметрії і несинусоїдальності устаткуванню. В системах електро- постачання середньої та низької напруги таким устаткуванням є асинхронні двигуни. Допустимою асиметрією напруги по зворотній послідовності для АД є 2%. Більш того, тривала робота двигуна з номінальним навантаженням за відсутності інших спотворень ЯЕ не супроводжується помітним зменшенням терміну служби і робочих характеристик. Зменшення терміну служби електричного устаткування від спотворень ЯЕ можливо визначити за формулою (4):

$$\gamma = e^{K_c^2}, (1.2)$$

де K_c – коефіцієнт спотворення.

Залежність коефіцієнта спотворення від показників асиметрії та несинусоїдальності має наступний вигляд:

$$K_c = \sqrt{434K_{2U}^2 + 389 \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \right)}. (1.3)$$

Виходячи з того, що допустиме значення коефіцієнта асиметрії за зворотною послідовністю для асинхронних двигунів при відсутності інших спотворень складає 2%. Підставивши в формулу значення K_{2U} в в.о. отримуємо допустиме значення коефіцієнта спотворення $K_{cд} = 0,4166$.

Наявність напруги вищих гармонік призводить до тих самих результатів що послідовність напруги основної частоти (додаткові втрати,

нагрівання, зменшення терміну служби). Тому зі зростанням несинусоїдальності напруги допустиме значення коефіцієнта зворотної послідовності повинно зменшуватися (через адитивну дію цих двох факторів) 1, навпаки. зворотна Коефіцієнт спотворення відповідає вимогам нормування узагальненого показника (1), але для можливості безпосереднього аналізу допустимих значень асиметрії і несинусоїдальності необхідно провести його нормування по допустимому значенню. Для цього праву і ліву частини формули (3) ділимо на K_{CD} . Перейшовши від відносних одиниць до відсотків, отримуємо наступну формулу:

$$K_C^Y = \sqrt{0,25K_{2U}^2 + 0,24 \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \right)}, (1.4)$$

Дану формулу можна використати для оцінки електромагнітної сумісності та визначення граничних рівнів складових зворотної послідовності основної частоти і гармонійних складових напруги в системах електропостачання для низької та середньої напруги при умові що $K_C^Y < 1\%$.

При цьому різниця між граничними значеннями складових не повинна перевищувати 1%.

1.1.2.3. Нормування показників якості електроенергії в електричних мережах високої напруги

В електричних системах більш високого рівня асиметрія та гармоніки напруги впливають на обладнання найбільше. В зв'язку з цим допустимі рівні показників якості електроенергії повинні визначатись на основі аналізу впливу неякісної електроенергії на роботу синхронних генераторів(8). Допустимий рівень напруги зворотної послідовності систем електропостачання високої напруги можна визначати як нижню границю діапазона що дорівнює 1%.

Співвідношення для можливих впливів напруги асиметрії та несинусоїдальності, так само, як для систем низької та середньої напруги, можна отримати для відповідних умов впливу. Відповідно до (8) коефіцієнт спотворення для турбогенераторів визначається наступною формулою:

$$K_c = \sqrt{1448K_{2U}^2 + 1223 \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}}\right)}. \quad (1.5)$$

У випадку якщо допустиме значення K_c приймається таке, що відповідає ефекту при $K_{2U} = 0,01$ та $K_{U(n)} = 0$, нормування показників якості електроенергії можна отримати у наступному вигляді:

$$K_C^Y = \sqrt{K_{2U}^2 + 0,845 \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}}\right)}, \quad (1.6)$$

де значення K_C^Y отримується у відсотках при підстановці коефіцієнтів асиметрії та несинусоїдальності у відсотках. Оцінка допустимих рівнів коефіцієнта зворотної послідовності основної частоти та гармонійних складових напруги за умови $K_C^Y \leq 1\%$.

1.1.2.4. Обчислення допустимого рівня гармонійних складових за прийнятим значенням показників якості електроенергії

Умови оцінки складових K_{2U} та $K_{U(n)}$ можуть використовуватись також для обчислення допустимого значення окремих складових гармонік за обраним значенням коефіцієнта асиметрії. Узагальнюючи, можна записати наступне:

$$K_C^Y = \sqrt{A_V K_{2U}^2 + B_V \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}}\right)} \leq 1, \quad (1.7)$$

де A_V та B_V коефіцієнти, залежні від класу напруги.

При декількох невідомих даний вираз має більше одного вирішення, тож величина допустимих значень окремих складових буде залежати від вибраного метода, за яким вони були знайдені. В алгоритмі розрахунку з (8) значення коефіцієнтів несинусоїдальності складових гармонік на $i+1$ визначаються наступним чином:

$$K_{U(n)}^{i+1} = K_{U(n)}^i - \left(\frac{\Delta U}{S}\right)_n, \quad (1.8)$$

де $K_{U(n)}^i$ – значення коефіцієнта несинусоїдальності складової гармоніки на i -му кроці;

ΔU – крок зменшення;

$S = \sum n$ – кількість гармонійних складових, що є діючими в даний момент часу;

n – гармонійна складова, для якої визначають $K_{U(n)}^i$.

Процес ітерації завершується при умові коли $K_C^Y \leq 1$.

Даний спосіб визначення коефіцієнта має свої недоліки, наприклад постійний крок зменшення ΔU . $K_{U(n)}^i$ постійно зменшується пропорційно до номера гармонійної складової. Можна сказати, що величини з більшим номером зменшуються з більшою швидкістю, хоча вони мають менший вплив на роботу асинхронних двигунів та синхронних генераторів. Для усунення даних недоліків можна визначати допустиме значення коефіцієнтів несинусоїдальності та асиметрії на основі градієнтного методі оптимізації.

Для спрощеного пошуку рішення можна піднести вираз K_C^Y до квадрату, тоді при заданому значенні K_{2U} наступна функція буде підлягати мінімізації:

$$f(x) = B_V \sum_{n \in N} \left(\frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \right), (1.9)$$

Де N – множина гармонійних складових, для яких треба знайти допустимі значення коефіцієнтів несинусоїдальності. Алгоритм визначення допустимих значень $K_{U(n)}$ при заданих номерах гармонік можна показати наступним чином:

1. Обирається за початкові наближення $K_{U(n)}$ нормально допустимі значення у відповідності до ГОСТ 13109-97. Приймається $i=0$;

2. Знаходяться складові вектора градієнта:

$$\nabla f(X^{(i)}) = \left[\frac{\partial f(X^{(i)})}{\partial x_n^{(i)}} \right] = \left[2B_V \frac{K_{U(n)}^{(i)}}{n\sqrt{n}} \right]. (1.10)$$

3. Визначається наближення допустимого значення коефіцієнтів несинусоїдальності:

$$K_{U(n)}^{(i+1)} = K_{U(n)}^{(i)} - 2B_V \lambda^{(i)} \frac{K_{U(n)}^{(i)}}{n\sqrt{n}}. \quad (1.11)$$

4. Перевірка умови завершення процесу ітерації:

$$\left| 1 - A_V K_{2U}^2 - B_V \sum_{n \in N} \left(\frac{K_{U(n)}^2}{n\sqrt{n}} \right) \right| \leq \varepsilon, \quad (1.12)$$

де $\varepsilon > 0$ – похибка співпадіння процесу ітерації.

Якщо дана умова виконується, допустимі значення $K_{U(n)}$ знайдено. Якщо умова не виконується, можна змінити крок ітерації $i=i+1$ і повторити алгоритм з другого пункту.

Результати розрахунків може бути подано на рис.1.1 та рис. 1.2.

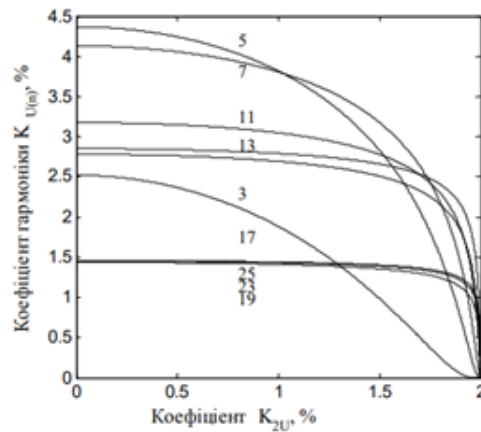


Рис. 1.1 – для систем електропостачання напругою 0,4 кВ

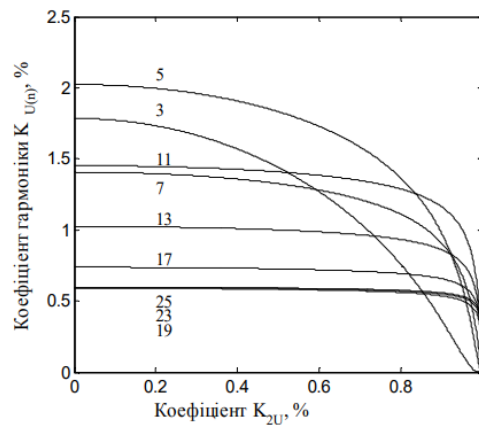


Рис. 1.2 – для систем електропостачання напругою 110-330 кВ

1.1.2.5. Оцінка ступеня невизначеності показників якості електричної енергії

Узагальнений показник якості електроенергії можна розраховувати за результатами вимірювань коефіцієнта асиметрії напруги зворотної послідовності та коефіцієнтів гармонійних складових K_{2U} , $n=2/40$, як при опосередкованому вимірюванні. За нормативними документами (7) результат вимірювань надається зі стандартним рівнем невизначеності. Вихідними даними для оцінки невизначеності є границі допустимої похибки вимірювань показників асиметрії та несинусоїдальності. За ГОСТ 13109-97 абсолютна допустима похибка коефіцієнта асиметрії напруги зворотної послідовності не повинна перевищувати 0,3%, а відносна похибка n -ї гармонійної складової не повинна перевищувати 0,5%, при коефіцієнті спотворень $K_U > 1\%$.

При таких умовах формула показника якості електричної енергії з урахуванням похибок набуває наступного вигляду:

$$(K_C^Y)' = \{0,25(K_{2U} + \Delta K_{2U})\}^2 + 0,224 \sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{K_{U(n)}^2 (1 + \delta_n)^2}{n\sqrt{n}} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1.13)$$

де $\Delta(K_{2U})$ – абсолютна похибка вимірювання коефіцієнта асиметрії;

δ_n – відносна похибка вимірювання коефіцієнта n -ї гармонійної складової.

Рівняння похибки Δ показника якості електроенергії отримується з дотриманням урахування приближеного співвідношення $(1 + a)^n = 1 + na + a^2 n(n - 1)/2$ за умов малих значень a та можливості неврахування незначних складових похибки.

Для того щоб отримати максимальну границю u_{max} невизначеності об'єднуємо складові похибки рівняння за модулем. Результати розрахунку зведемо до таблиці. Такий розрахунок гарантує максимально можливу границю.

Таблиця 1.2

$K_{2U}, \%$	$u_{max}, \%$
--------------	---------------

0	0,016
0,4	0,045
0,8	0,074
1,2	0,1
1,6	0,13
2	0,16

1.2. Базові характеристики асиметрії напруги

Якість електроенергії нормується для мереж будь-якої напруги за коефіцієнтом спотворення синусоїдальної форми кривих напруг та коефіцієнтом n -ї гармонійної складової до 40-ї гармоніки включно. У розрахунках надійності несинусоїдальність струмів і напруг не враховується, так як виходить з помилкового припущення про незначний вплив даних параметрів на надійність функціонування електрообладнання електроенергетичної системи, але, перш за все, у зв'язку з відсутністю методичного забезпечення вирішення таких завдань.

Основна частина встановленої потужності джерел вищих гармонік струму знаходиться у споживача, проте в мережах також утворюється досить суттєва частка. До них відносяться трансформатори, струм холостого ходу яких містить до половини струмів вищих гармонік. Рівень струмів вищих гармонік в електричних мережах можна визначити їх сумарним впливом на електрообладнання.

На практиці більшість випадків порушень нормальних умов роботи електричного обладнання викликані явищами резонансу в енергосистемі. Це обумовлено наступними факторами:

- наявністю джерел вищих гармонік струму, що утворюються нелінійними елементами електроенергетичної системи, в тому числі і електроприймачами, враховуючи що спектр вищих гармонік включає не тільки кратні основній частоті (50 Гц), а й проміжні гармоніки;

- наявністю ємнісних елементів енергосистеми, в тому числі і конденсаторів, необхідних для компенсації реактивної потужності для

забезпечення нормальних рівнів напруги та підвищення коефіцієнта потужності.

Резонансні явища можуть бути причиною перенапружень і надструмів на елементах енергосистеми. Конфігурація енергосистеми безперервно змінюється, так само як і її частотні характеристики, що наперед невідомі. Резонанси можуть утворюватись на декількох частотах. При цьому значення струмів і напруг може бути незначним і безпечним для роботи електрообладнання що знаходиться у роботі. Наприклад, робота конденсаторів тривало допустима при $U=1,1 \cdot U_{ном}$ і $I=1,3 \cdot I_{ном}$ на основній частоті. Резонанси при достатньо великих активних опорах системи можуть не створювати небезпеки для обладнання що встановлене.

В звданні оцінок надійності функціонування електроенергетичної системи за наявності гармонійних складових потрібно враховувати подібні явища і, звичайно, рішення таких задач повинне мати локальний характер. Для локалізації цих подій потрібно оцінити якість електроенергії та встановити:

- можливість утворення резонансних явищ в даній системі;
- в якій частині енергосистеми найбільш вірогідне виникнення резонансів;
- на які джерела вищих гармонік будуть утворюватись резонансні явища;
- які параметри режиму у вузлах енергетичної системи, де з'являються резонанси.

Вищі гармонійні складові струму, що генеруються нелінійними електроприймачами, призводять до негативних та незворотних наслідків.

За результатами, отриманими дослідниками цієї проблеми і, які характеризують надійність електропостачання, зупинимося на тих, які найбільшою мірою, при перевищенні показниками якості електроенергії норм, встановлених ДСТУ 13109-97, впливають на електрообладнання енергосистеми, її системи захисту та автоматики, телекомунікаційні системи зв'язку та управління. Останнє важливо для забезпечення надійності.

1.3. Основні причини виникнення асиметрії

Асиметрія напруги і струмів трифазної системи є одним з найважливіших показників якості електроенергії. Причиною появи асиметрії напруги і струмів можуть бути несиметричні режими систем електропостачання. Широке застосування різних видів однофазних електротермічних установок значної потужності до 10 000 кВт і трифазних дугових печей призводить до великого збільшення частки несиметричних навантажень в промисловості. Під'єднання таких несиметричних одно- і трифазних навантажень такої потужності до трифазних мереж викликає в системах електропостачання тривалий несиметричний режим, що характеризується асиметрією напруги а струмів.

В системах електропостачання розрізняють короткочасні (аварійні) і тривалі (експлуатаційні) несиметричні режими. Короткочасні несиметричні режими зазвичай пов'язані з різними аварійними процесами, як, наприклад, несиметричні КЗ, обриви одного або двох проводів повітряної лінії з замиканням на землю і т. д. Тривалі несиметричні режими зазвичай обумовлені асиметрією елементів електричної мережі або підключенням до системи електропостачання несиметричних (одно-, дво- або трифазних) навантажень.

Асиметрію напруги і струмів, обумовлена асиметрією елементів електричної мережі, називають поздовжньою. Прикладом поздовжньої асиметрії є неповнофазні режими повітряних ліній і асиметрія параметрів фаз окремих елементів мережі. Поздовжня асиметрія характерна також для спеціальних систем електропередачі: два провідники - земля (ДПЗ), два провідники - рейки (ДПР), два провідники-труба (ДПТ) і т. д.

Асиметрію напруг і струмів, викликану підключенням до мережі багатофазних і однофазних несиметричних навантажень, називають поперечною. Поперечна асиметрія виникає також при нерівності активних і реактивних опорів окремих фаз деяких приймачів електроенергії (дугові електropечі).

Для аналізу та розрахунків несиметричних режимів у трифазних ланцюгах в більшості випадків застосовується метод симетричних складових, що базується на поданні будь-якої трифазної несиметричної системи величин у вигляді суми трьох симетричних систем величин. Ці симетричні системи, що в сукупності можуть утворювати несиметричну систему величин, називаються її симетричними складовими. Симетричні складові відрізняються одна від одної порядком проходження фаз, тобто порядком, в якому фазні величини проходять через максимум, і називаються системами прямої, оберненої та нульової послідовності.

Асиметрія міжфазних напруг може бути викликана наявністю складових зворотної послідовності, а асиметрія фазних – також наявністю складових нульової послідовності.

В якості міри асиметрії напруг використовується коефіцієнт асиметрії напруг $k_{\text{ном},U}$ (ε_2), що визначається як відношення напруги зворотної послідовності основної частоти до номінальної лінійної напруги, %:

$$k_{\text{ном},U} = \frac{U_2}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, (1.14)$$

Аналогічно, коефіцієнт асиметрії струмів:

$$k_{\text{ном},I} = \frac{I_2}{I_{\text{ном}}} \cdot 100\%, (1.15)$$

При наявності складових нульової послідовності відбувається зміщення нейтралі трифазної системи, що характеризується коефіцієнтом нерівноваженості напруг, який визначається як відсоткове відношення напруги нульової послідовності до номінальної фазної напруги:

$$k_{0,U} = \frac{U_0}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%, (1.16)$$

Симетричні складові напруг прямої U_1 і зворотної U_2 і нульової U_0 послідовностей визначають за відомими, співвідношеннями для симетричних складових прямої послідовності:

$$U_1 = \frac{1}{3}(U_a + aU_b + a^2U_c), (1.17)$$

Зворотної послідовності:

$$U_2 = \frac{1}{3}(U_a + a^2U_b + aU_c), (1.18)$$

Нульової послідовності:

$$U_3 = \frac{1}{3}(U_a + U_b + U_c), (1.19)$$

де U_a, U_b, U_c – фазні напруги мережі;

$a = e^{j2\frac{\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$ – комплексне число – фазний множник;

$a^2 = e^{j2\frac{\pi}{3}} \cdot e^{j2\frac{\pi}{3}}$ – квадрат комплексного числа.

Коефіцієнт асиметрії $k_{ном,U}$ і є нормованим показником якості електроенергії. Відповідно до існуючих нормативних документів $k_{ном,U} \leq 2\%$ тривале допустиме на затискачах будь-якого трифазного симетричного приймача електроенергії. У випадках, коли коефіцієнт асиметрії більше зазначених меж, вживають заходів щодо його зниження.

Асиметрія напруг в системах електропостачання спричиняє значний вплив па роботу окремих елементів мережі і приймачів електроенергії.

1.4. Особливості аналізу інтергармонік та їх вплив на ефективність електричних мереж

Інтергармоніки являють собою синусоїдальні процеси зміни за часом миттєвих значень и напруги, частота яких відрізняється від частоти 50 Гц у меншу або більшу сторони. У проектуванні використовуються періодичні графіки $u(t)$, по яких розрахунок будь-яких гармонік виконується шляхом розкладання в ряд Фур'є за час тривалості циклів. У діючих електричних мережах такої ясності немає, оскільки стандарт передбачає визначення тільки вищих гармонік різними вимірюваними вікнами у широкому діапазоні їх ширини: від 0,08 до 0,5 с. показано, що такий підхід не забезпечує достовірності оцінок ЕМС за вищими гармоніками.

Для наочності розглянемо суму:

$$u(t) = u_f(t) + u_v(t) = \sin\omega_1 t + a\sin\omega_v t (1.20)$$

перша (корисна) складова якої має частоту $f_1 = 50$ Гц і одиночну амплітуду, а друга є завадою – інтергармонікою з частотою ν і амплітудою $\alpha < 1$. Якщо частота завади є раціональним числом, то процес буде періодичним, тривалість циклу T_μ якого залежить від співвідношення частот f_1 і ν . При ірраціональній частоті процес буде неперіодичним. Слід зазначити, що мале змінення частоти інтергармоніки може приводити до значного змінення тривалості циклу. Наприклад, при $\nu = 4$ Гц цикл $T_\mu = 0,5$ с, а при близькій частоті $\sqrt{16,1} = 4,012$ Гц він є нескінченним.

Ідеалізоване гармонічне коливання з частотою $\lambda \ll 50$ Гц приблизно описується виразом, до якого входить не тільки несуча частота 50 Гц, але і дві інтергармоніки. Тривалість циклу залежить від співвідношення частот 50 Гц і λ : наприклад, при $\lambda = 25$ Гц маємо $T_\mu = 0,04$ с, а при 27 Гц – 1 с. При великих частотах (практично $\lambda > 6$ Гц) у циклі 20 мс з'являються інші гармоніки, які модулюються частотою λ , тому фактичний спектр гармонік значно збільшується.

У діючих електричних мережах процес $u(t)$ є випадковим, для якого поняття «гармоніка» не має сенсу. Він описується спектральною щільністю, яка має великий максимум на частоті 50 Гц і може мати максимуми на інших частотах. Оскільки показники несинусоїдальності нормуються окремо від складової 50 Гц, з процесу $u(t)$ доводиться виділяти несинусоїдальну складову $uv(t)$ шляхом пропускання $u(t)$ через вузькосмуговий фільтр з частотою настройки 50 Гц, або поциклічним виділенням синусоїди 50 Гц на інтервалах 0,02 с.

В загальному, вплив інтергармонік на електричне обладнання, системи телемеханіки та зв'язку аналогічний впливу на них вищих гармонік, проте, в окремих випадках може бути більшим.

Як правило, найактуальніші параметри якості електричної енергії пов'язані з формами напруги, що включають в себе величину й баланс трифазних напруг, перехідні коливання, а також індивідуальні та загальні напруги гармонік та інтергармонік.

Оскільки інтергармоніки являють собою одне з додаткових гармонічних навантажень, варто розглянути розповсюджені проблеми що виникають при появі як гармонік, так і інтергармонік.

Тому, в першу чергу варто розглянути гармоніки в цілому більш детально.

Між гармоніками напруги та струму частоти живлення спостерігаються подальші частоти, які не є цілими частотами фундаментальних частот. Вони можуть з'являтися як дискретні частоти або як широкополосний спектр.

Total Harmonic Distortion (THD) - це показник ефективного значення гармонічних компонентів спотвореної форми сигналу. Цей показник використовується як для струму, так і для напруги. *THD* є важливим аспектом в аудіо, комунікаціях та енергосистемах і, як правило, але не завжди, повинен бути якомога меншим.

Гармоніки або гармонічні частоти періодичної напруги або струму є частотними складовими сигналу, які є цілими кратними частоті основного сигналу. Це основний результат, який показує аналіз періодичного сигналу Фур'є. Гармонічні спотворення - це спотворення сигналу внаслідок цих гармонік.

Напруга чи струм, які є суто синусоїдальними, не мають гармонічних спотворень, оскільки це сигнал, що складається з однієї частоти. Напруга або струм, які є періодичними, але не суто синусоїдальними, матимуть у собі високочастотні компоненти, що сприятимуть гармонічним спотворенням сигналу. Загалом, чим менше періодичний сигнал синусоїдальний, тим сильнішими є гармонічні компоненти і тим більше гармонічних спотворень він буде мати.

Отже, суто синусоїдальний сигнал не має спотворень, тоді як квадратна хвиля, яка є періодичною, має значну кількість гармонічних спотворень.

На рис 1.3, 1.4 і 1.5 представлені візуальні порівняння в часовій області та в частотній області синусоїдальної напруги та прямокутної напруги.

Vsine

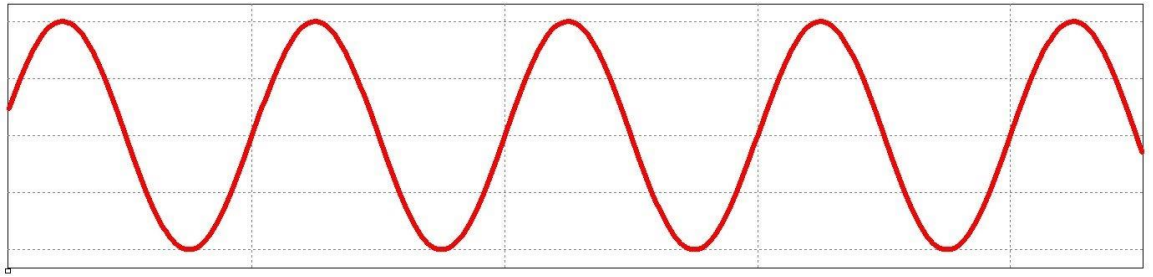


Рис. 1.3 – Синусоїдальна напруга в часовій області

Vsquare

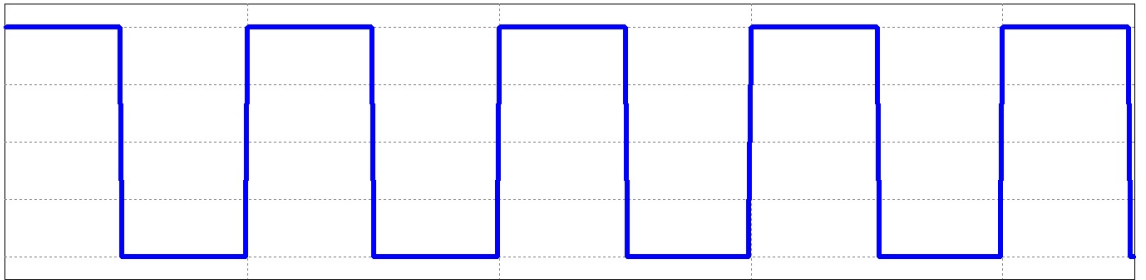


Рис. 1.4 – Напруга прямокутної хвилі в часовій області

Harmonics of a sinusoidal voltage



Harmonics of a square wave voltage

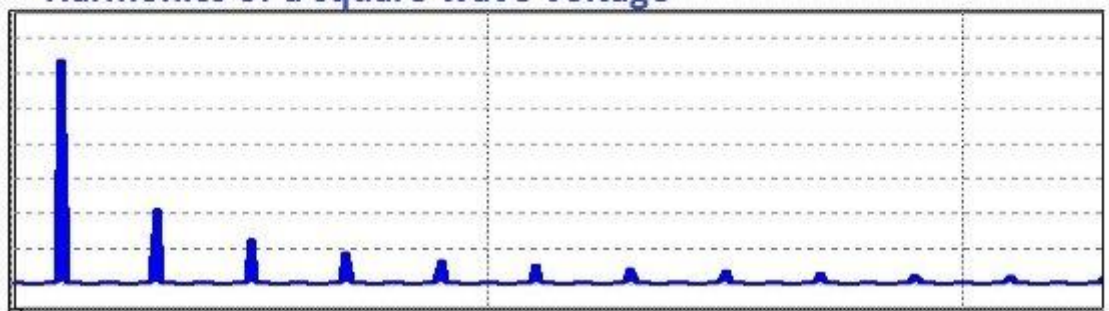


Рис. 1.5 - Синусоїдальна напруга та напруга прямокутної хвилі в частотній області

На рисунку 1.4 показано приклад розкладання складного спотвореного сигналу шляхом додавання до основного сигналу частотою 50 Гц третьої,

п'ятої та сьомої гармонік, що являють собою 150 Гц, 250 Гц та 350 Гц відповідно.

Для симетричних форм сигналу можуть з'являтися тільки непарні (3,5,7 і т.д.) гармоніки, як на прикладі рисунку 1.6.

Для асиметричних форм сигналу можуть з'являтися частина непарних або парних фундаментальних (2,4,6 і т.д.). Також, в асиметричних сигналах можуть з'являтися компоненти постійного струму, що показуються як сигнали 0 Гц.

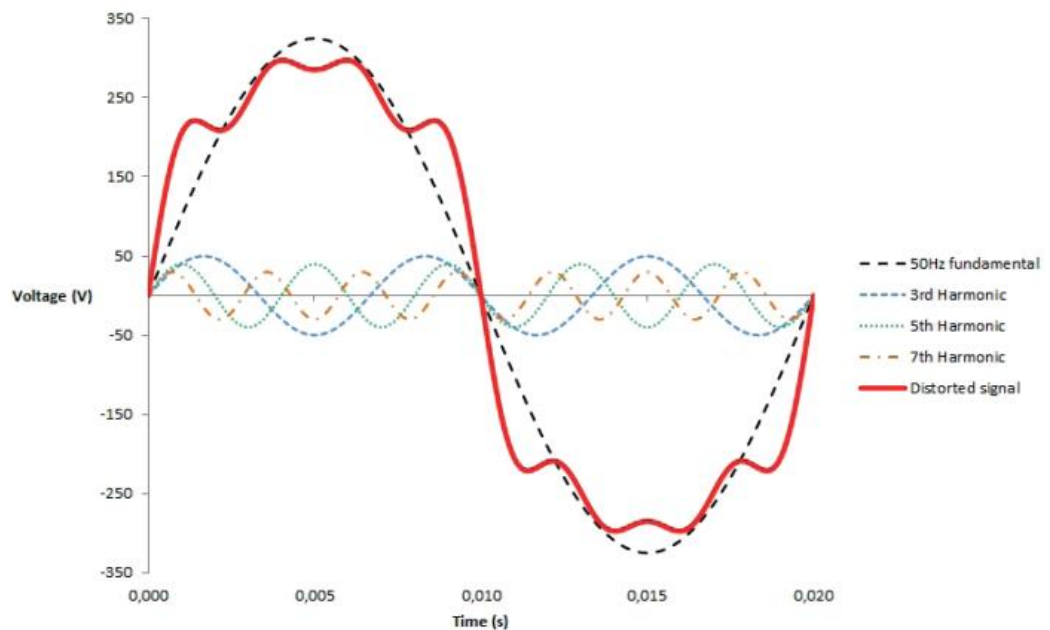


Рис. 1.6 – Приклад розкладання спотвореного сигналу

Може бути виявлено наступні наслідки дії гармонік на обладнання та електроустановки:

- Додані втрати ефективності в електричних системах;
- Неустановлені резонанси;
- Логічні помилки в цифрових схемах;
- Перевантаження проводів для трансформаторів;
- Несправність двигунів та генераторів;
- Небажане спрацьовування вимикачів, а також відключення запобіжників.

Генерація, що виробляє електроенергію, генерує значення сигналу, максимально наближене до суто синусоїдального.

Проте, в системі існують навантаження та пристрої, що мають нелінійні характеристики та призводять до гармонійних спотворень сигналів струмів та напруг. Так як в мережах присутня велика кількість нелінійних навантажень, кількість спотворень також велика.

Розповсюджене використання електроприладів, двигунів з регулюванням швидкості та ін. в багатьох областях спричиняють значне спотворення напруг та струмів в системах розподілу. Що в свою чергу обумовлює необхідність більш досконалого вивчення впливу гармонічних спотворень на захист, контроль та вимірювання в електричних системах, промисловому та побутовому використанні.

Оскільки основна причина появи гармонік – нелінійне навантаження, гармонійні спотворення можуть з'являтися в мережах завдяки таким джерелам як трансформатори, реактори та генератори змінного струму. Таке спотворення має властивість змінюватись при зміні навантаження системи.

Також, існують гармоніки, що виникають в результаті протікання перехідних процесів та блискавок, що короткотривалі, але за рахунок великого значення напруги можуть пошкодити систему постачання та чутливу техніку.

Існують гармоніки, що з'являються в установках споживачів, що створює несинусоїдальні струми навантаження, що можуть взаємодіяти з елементами схем в межах установки або зовнішньої системи живлення створюючи перешкоди та впливаючи на інших споживачів, що під'єднані до однієї і тієї ж системи.

У конденсаторах з'являються наступні завади:

- реактивна потужність збільшується завдяки гармонійним напругам;
- діелектричні втрати збільшуються, тому відбувається додаткове нагрівання;
- відмова батарей конденсатора від діелектричного розриву або
- перевантаження реактивної потужності;
- очікувана тривалість життя зменшується;

- може відбуватися резонанс, що призводить до гармонійного збільшення;
- перевантаження.

Джерела гармонічних спотворень

Якщо говорити про джерела гармонічних спотворень, то ними можуть бути не тільки споживачі, але і джерела живлення. Для споживання синусоїдальної напруги 50 Гц або 60 Гц це також означає суто синусоїдальний струм.

При цьому синхронні генератори є джерелами лише невеликої частки вищих гармонік, тому ними часто нехтують. Спотворення ж, що генеруються споживачами, які мають нелінійну вольт-амперну характеристику, ігнорувати не можна. Список споживачів, які мають найбільший вплив на синусоїду, складається з:

- вентильних перетворювачів;
- перетворювачів частот;
- печей (рудо-термічних, індукційних, дугових сталеплавильних і т. п.);
- електричних двигунів та трансформаторів;
- електрозварювальних установок;
- газорозрядних ламп.

Вентильним перетворювачам відводиться роль досить сильних джерел гармонік. При розгляді яких, часто використовуються шестипульсні мостові схеми, можна зробити висновки, що переважаючими в них будуть канонічні вищі гармоніки (250 Гц, 350 Гц, 550 Гц, 650 Гц). У дванадцятипульсних схемах перші дві гармоніки з перерахованих вище теоретично відсутні, тому переважають останні дві.

Перетворювачами частоти широко користуються на різних промислових підприємствах. Вони також генерують як канонічні вищі гармоніки, так і інтергармоніки. На рис. 1.7 зображена структурна схема перетворювача частоти разом з дзвіном постійного струму.

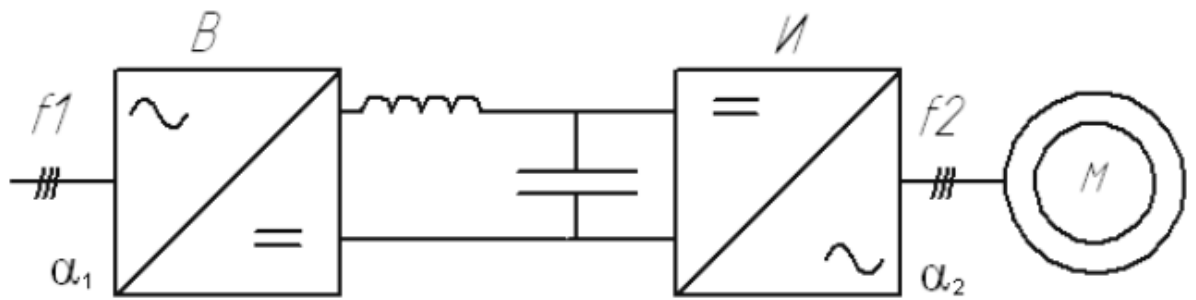


Рис. 1.7 - Схема перетворювача частоти з дзвіном постійного струму
 Пристрій включає в себе інвертор И, випрямляч В, а також індуктивно-емнісний фільтр.

Дзвін постійного струму характеризується наявністю пульсуючого струму. Внаслідок цього в мережевому струмі, крім появи інтергармонік, спостерігається збільшення канонічних вищих гармонік. Тому відносний рівень електромагнітних перешкод в мережевому перетворювачі частоти постійного струму значно перевершує рівень електромагнітних перешкод струму мережі, вентильні перетворювачі тиристорних електроприводів, прокатних станів, електролізних установок і ін.

Дугові сталеплавильні печі генерують велику кількість електромагнітних перешкод:

- коливання,
- вищі гармоніки,
- інтергармоніки,
- несиметрія напруги.

У максимальному ступені, електромагнітні перешкоди проявляються в момент розплавлення металу.

Зварювальні апарати, які живляться від електромережі, генерують практично весь спектр електромагнітних перешкод, які впливають на якість електричної енергії. Крім цього, вони генерують і інтергармоніки. Наприклад, діапазон таких перешкод, створюваних точковим зварюванням, від 35 до 75 Гц. При цьому амплітуди можуть досягати 20% базової гармоніки. Енергія, що знаходиться в дискретному спектрі, становить близько 5-20% від енергії, що

належить до змішаного спектру. Що стосується коефіцієнта несиметрії, то він в даному випадку обмежений інтервалом від 1 до 5 відсотків.

Що стосується газорозрядних ламп (ртутних і люмінесцентних), то вони відносяться до генераторів вищих гармонік третього, п'ятого та сьомого порядків. Електричне навантаження житлових будинків характеризується досить широким діапазоном електричних приладів. Класифікація, зроблена за їх призначенням і впливом на мережу, складається з наступних груп: споживачі, які мають активну потужність (обігрівачі, праски і т.п.); прилади з трифазними асинхронними двигунами (насоси, ліфти і т.п.); прилади з однофазними асинхронними двигунами (компресори холодильних установок); прилади, що мають колекторні мотори (дрилі, болгарки, і т. п.); зварювальні апарати; пристрої, призначені для випрямлення струму; радіоелектронні прилади (телевізори, оргтехніка, персональні комп'ютери); лампи і мікрохвильові печі. Окремо всі ці прилади мають на мережу досить слабкий вплив, однак при одночасному використанні вони можуть стати сильним джерелом електромагнітних перешкод.

Причини несинусоїдальної форми струму і напруги і його вплив на споживачі електричної енергії

Сучасна промисловість і сфера послуг сьогодні не можуть обійтися без різноманітних напівпровідникових пристроїв. Даний список складається з побутових приладів, вентильних перетворювачів, зварювальних апаратів, електродвигунів і т. п. Всі ці пристрої є досить сильними джерелами електромагнітних перешкод. Наприклад целюлозно-паперова промисловість характеризується тільки відхиленням напруги. А ось машинобудівні підприємства, що використовують потужні зварювальні апарати, впливають на якість електроенергії набагато сильніше. Тут присутні коливання, відхилення і несиметрія напруги. Несинусоїдальність ж є поширеним явищем на металургійних підприємствах і тягових підстанціях залізничного транспорту. Низька якість електроенергії пов'язана зі значним економічним збитком, який складається з електромагнітних і технологічних складових.

Перша група характеризується зменшенням експлуатаційного терміну ізоляції електричного обладнання. Причиною того є електричне та теплове старіння ізоляції. Друга – впливом якості електроенергії на технологічні установки та їх продуктивність. Це безпосередньо пов'язано із собівартістю виробленого продукту. Саме тому кількісний аналіз надійності електрообладнання при зниженій якості електричної енергії є таким важливим.

Вплив гармонічних спотворень на трансформатори

Гармонічні спотворення напруги не тільки скорочують експлуатаційний термін ізоляції трансформаторів, а й сприяють збільшенню втрат, які пов'язані з виникненням вихрових струмів в сталі. Крім цього, страждає від таких гармонік і обмотка, і гістерезис. Що стосується перетворювальних трансформаторів, то тут найважливішу роль відіграють втрати в обмотці. Пов'язано це з тим, що фільтри, які працюють на змінному струмі, не знижують в обладнанні гармонік струму. Дана особливість призводить до необхідності встановлювати підвищеної потужності устаткування. Ще одна проблема пов'язана з місцевими перегрівками баків трансформаторів.

Негативний аспект впливу гармонік на потужні трансформатори полягає в циркуляції потроєного струму нульової послідовності в обмотках, з'єднаних в трикутник. Це може привести до їх перевантаження.

Вплив гармонічних спотворень на роботу телевізорів та комп'ютерів

Гармоніки, які сприяють збільшенню піку напруги, часто стають причиною різних перешкод, що позначаються як на яскравості, так і на самому зображенні на екрані телевізора. Існують межі на допустимі рівні спотворень в мережах, що живлять комп'ютери і системи обробки даних. У деяких випадках вони виражаються в відсотках від номінальної напруги (для комп'ютера – 5%) або у вигляді відношення піку напруги до діючого значення (CDC встановлює допустимі його межі значеннями $1,41 \pm 0,1$

Вплив гармонік на вимірювання потужності і енергії

Процес калібрування вимірювального обладнання, як правило, відбувається при напрузі, синусоїда якого позбавлена електромагнітних перешкод, оскільки наявність вищих гармонік може збільшити його похибку. Найважливішими показниками при цьому є напрямок і розміри вищих гармонік, адже саме від них і буде залежати розмір похибки.

Гармонічні спотворення часто стають причинами похибок вимірювальних приладів. Стандартний індукційний лічильник може завищувати реальні свідчення на 5%, особливо якщо споживач має відповідні джерела спотворення. В результаті вплив даних спотворень відображається на рахунках за електроенергію, тому споживачі самі зацікавлені в установці спеціальних засобів, що зменшують несинусоїдальність.

При цьому кількісні дані, які відображають вплив гармонік на ступінь точності вимірювання максимумів навантаження, відсутні. Імовірно можна сказати, що даний вплив відповідає впливу гармонік на ступінь точності визначення енергії. Необхідність точних вимірювань може бути задоволена установкою дорогих високоякісних лічильників.

Реактивна потужність також опиняється під впливом гармонік, які можуть зробити результати її вимірювання некоректними. Дана величина може бути визначена тільки в випадках з синусоїдальними напругами і струмами. Крім цього, гармоніки спотворюють і результати вимірювань коефіцієнтів потужності. При цьому вплив вищих гармонік на калібрування та перевірку лабораторних приладів згадується досить рідко, проте дане питання також носить дуже важливий характер.

Порівняно з джерелами живлення, ефекти гармонічних напруг та струмів гармонік значно виражені на генераторах завдяки тому, що їх джерело повного опору в декілька разів більше, ніж у трансформатора. Основний вплив гармонік напруги та струму - це збільшення нагріву машини. Ефективність машини в такому випадку негативно впливає на зв'язок з джерелом живлення що також є джерелом гармонічних спотворень.

Гармонічні спотворення в обмотках також можуть створювати звуковий шум. Обертаючий момент в електродвигунах також створює спотворення, що може створювати завади для плавного пуску, недосягнення двигуном робочої швидкості та інші небажані ефекти. Для зменшення ефекту від гармонічного нагріву, кількість генераторів нелінійного навантаження повинна бути зменшена.

Окрім того, наявність компонентів гармонічної послідовності нелінійного навантаження створює локальні пульсації нагріву та обертаючого моменту з коливаннями.

Однією з основних причин втрат ефективності, перегріву та зниження потужності в генераторах є постійний опір генераторів, що є досить високим. За рахунок цього поточні гармонічні спотворення передаються в гармонічні спотворення напруги, тобто, впливають на інші навантаження, які також споживають електроенергію з того ж джерела. Для блоку двигунів вони називаються навантаженням електричної установки, що перевищує джерело напруги.

Проте прямі наслідки гармонік для двигунів та генераторів в основному однакові:

- основні втрати збільшуються за дією гармонік, що викликаються вихровими струмами та гістерезисом;
- Додаткові втрати пропорційні як THD , так і частоті;
- Негативні послідовності гармонік мають силу обертаня в якості протидії обертаючому моменту, тому вони створюють вібрації та збільшення тепла, що необхідно усувати.

При розгляданні наслідків виникнення гармонік окремо в генераторах, можемо визначити наступне:

- Відбувається нагрів ротора в циліндричних роторних синхронних генераторах;

- Виникають пульсуючий та коливальний моменти, що включають в себе торсіонні коливання елементів ротора та деформацію турбін.

Двигуни змінного струму в їх найпростішому виді використовують одно- та трифазні мости для перетворення змінного струму в постійний.

Тиристри використовуються для отримання змінного частотного виходу, що під'єднується до трифазного двигуна, швидкість якого пропорційна частоті, що використовується. На рисунку 1.6 показано базовий перетворювач трифазних частот. Перетворювач даного типу знижують 3 та 9 гармоніки, проте 5 та 7 збільшуються. Зменшення 3 та 9 гармонік має знак струму нейтральної 3-фазної системи, так як вони мають нульову фазову послідовність та додаються в нейтральну.

Зміна 5 та 7 гармонік має наслідки для обертаючих двигунів, оскільки 5 гармоніка має негативну фазову послідовність, що генерує негативний обертаючий момент, а 7 гармоніка має позитивну фазову послідовність, що створює позитивний обертаючий момент.

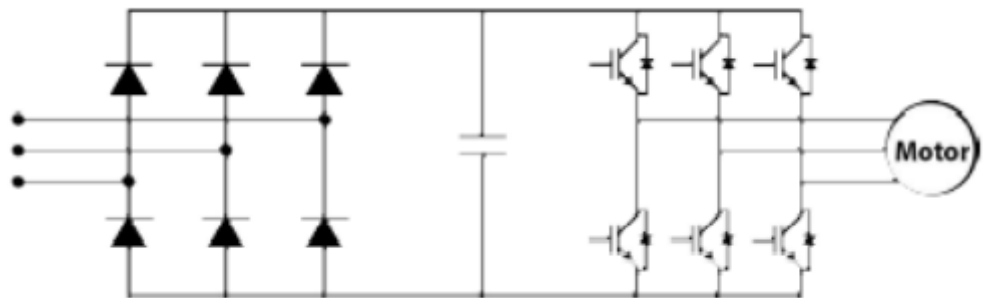


Рис. 1.8 – Базовий шестиімпульсний перетворювач частоти

На рисунку 1.8 показано гармонійний спектр струму базового 6-імпульсного перетворювача частоти.

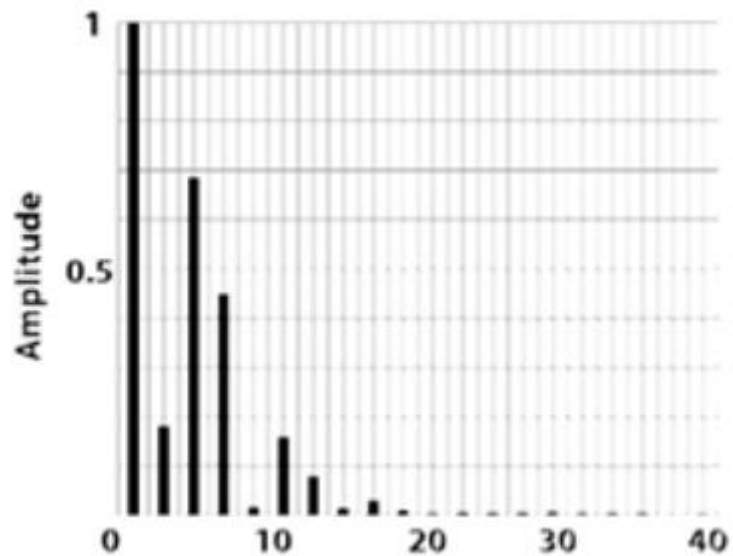


Рис. 1.9 – гармонічний поточний спектр базового 6-імпульсного перетворювача частоти

Також мають місце більш складні схеми, наприклад дванадцятиімпульсний перетворювач частот з паралельним з'єднанням, що показаний на рисунку 1.10. Такі схеми можуть значно знизити струми навантаження, що видно на рис. 1.11.

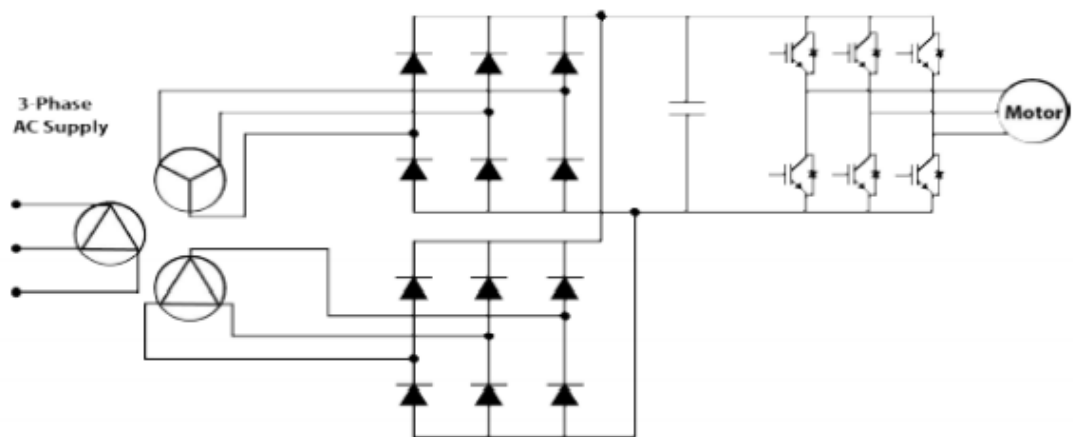


Рис. 1.10 – дванадцятиімпульсний перетворювач з паралельним з'єднанням

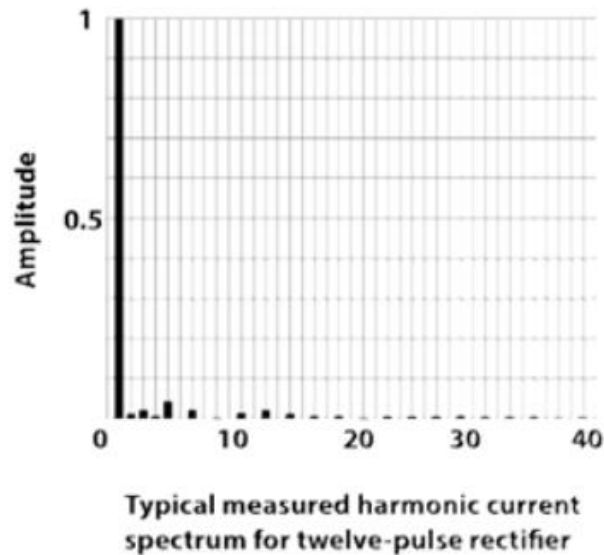


Рис. 1.11 – 12-імпульсний перетворювач з паралельним з’єднанням
 Але невеликі дисбаланси напруги живлення можуть викликати значні гармонічні спотворення.

Гармоніки збільшують втрати в асинхронних двигунах змінного струму аналогічно до трансформаторів та викликають підвищений нагрів через додаткові втрати в обмотці статора та ланцюгах ротора. Ці втрати особливо посилюються на частотах вище 300 Гц.

Так як погіршення якості електричної енергії витікає з кожного етапу: генерація, передача та розподіл, існує необхідність забезпечення належної якості для тривалої експлуатації електричних приладів.

Витікання магнітних полів, що викликані гармонічними струмами в кінцевих обмотках статора та ротора, утворюють додаткові залежні втрати від вихрового струму. Істотні основні втрати можуть також з’являтися в асинхронних двигунах з перекрученими роторами внаслідок високочастотних індукованих струмів та швидких змін потоку у статорі та роторі.

Вплив гармонік струмів та напруг на асинхронні машини може проявлятися двома різними способами. Перше явище стосується впливу гармонік на обертаючий момент. Ефект гармонічних спотворень незначний від 10% до 20%. Це стосується як початкового моменту, так і постійного обертаючого.

З іншого боку, спотворення гармонік викликає розвиток моменту коливання, що пов'язано зі взаємодією гармонічних струмів та магнітних полів основної частоти. Їх відносні амплітуди приблизно пропорційні відносним амплітудам відповідних гармонійних струмів. Середній обертаючий момент, що використовується або початковий обертаючий момент, не мають впливу, проте момент коливання може створювати механічні коливання та деформувати підшипники як наслідок.

Гармоніки напруг та струмів живлення викликають додаткові втрати в електричних машинах. Деякі з цих втрат можна класифікувати наступним чином:

- Основні втрати, що пов'язані з основними гармонійними потоками. Такі втрати виникають при високих частотах, проте такі гармонійні потоки подавляються за допомогою індукційних вторинних струмів.

- Первинні втрати $I_{rms}^2 R$ що пов'язані з загальним вхідним діючим значенням струму;

- Вторинні $I_{rms}^2 R$ втрати;

- Втрати, що пов'язані з косими потоками витоку. Вони виникають при відносній нахилі між первинними та вторинними провідниками. При основних частотах 50 Гц та 60 Гц втрати незначні, проте на гармонічних частотах вони значно зростають.

- Втрати, пов'язані з витіканням потоку. Такі втрати виникають в кінцевих областях обмоток статора та ротора.

- Втрати, пов'язані з високочастотними навантаженнями.

На асинхронний двигун також впливають компоненти гармонійних послідовностей.

Так, компоненти позитивної послідовності(7,13,19) сприяють появі обертаючого моменту, тоді як компоненти негативної послідовності(5,7,11, і тд.) діють проти напрямку обертання, що призводить до коливання обертаючого моменту. Компоненти нульової послідовності не поворотні, тому пов'язана з ними енергія перетворюється в теплову. Величина обертових

коливань, що формуються внаслідок таких компонентів гармонічної послідовності, може бути досить значною та викликати вібрації при обертанні валу.

На рисунку 1.12 показано залежність THD при зміні шляхом регулювання кута тиристора приводу зі змінною швидкістю.

Обертальний момент що виникає внаслідок появи 5-ї та 7-ї гармонік, може призводити до падіння загального обертаючого моменту, що виникає при запуску машини та призводить до недостатньої роботи.

На рисунку 1.13 показаний перетин між обертаючим моментом навантаження та результуючим обертаючим моментом що виникає внаслідок впливу сьомої гармоніки. Це в свою чергу призводить до припинення навантаження в точці перетину і двигун не зможе досягти необхідної швидкості роботи.

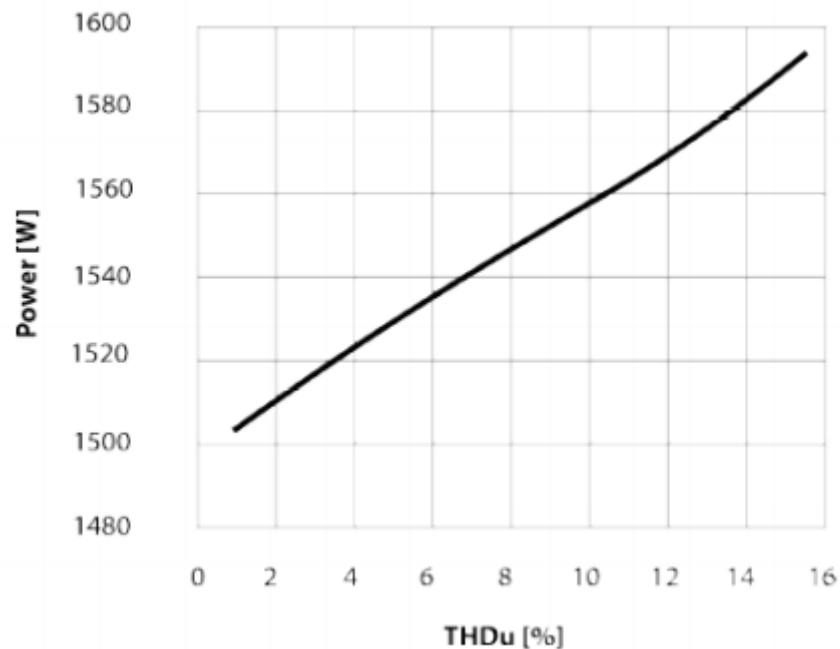


Рисунок 1.12 – Втрати індуктивного двигуна і THD

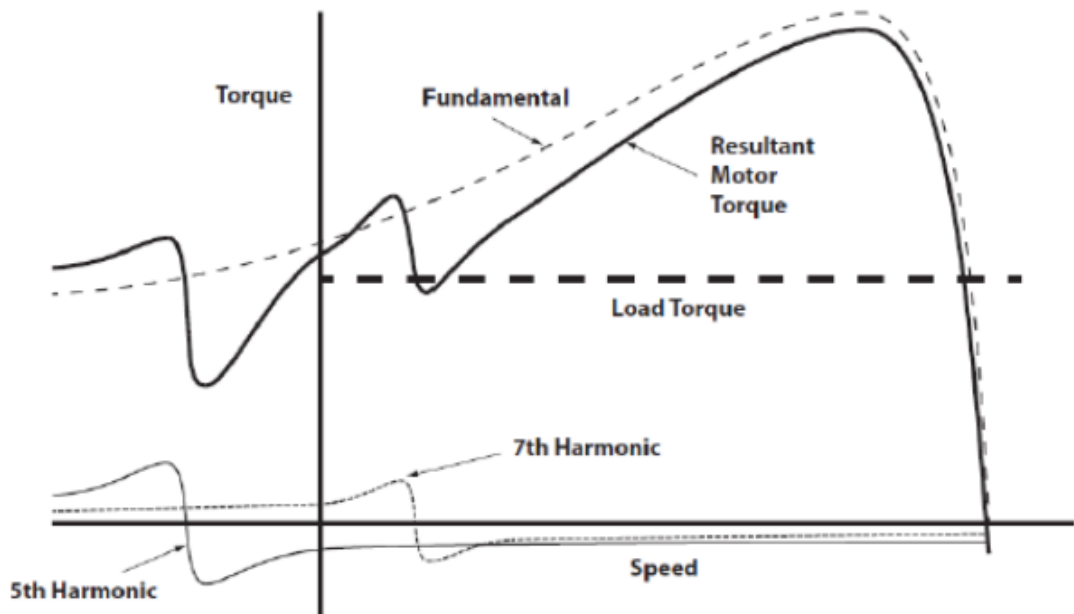


Рисунок 1.13 – Характеристики обертання індукційного двигуна

Високий пусковий струм асинхронного двигуна не менше восьмикратного струму навантаження. Його типова тривалість від 20 до 30 секунд і двигуни розробляються таким чином щоб протистояти цьому перевантаженню. Проте у випадку якщо двигун не може досягти повної швидкості в установлений час, двигун перегріється та вийде з ладу через тривалий пусковий струм та зменшену вентиляцію.

5-а гармоніка має негативну послідовність фаз, тому обертаючий момент, що з'являється за рахунок виникнення 5-го гармонічного струму, буде діяти проти позитивного моменту. Цей негативний обертаючий момент зменшує ефективність двигуна.

5-й та 7-й гармонічні моменти також можуть поєднуватись, щоб створювати механічні коливання між двигуном і навантаженням, збуджуючи механічну резонансну частоту системи, створюючи тим самим механічні сили та вібрацію високої напруги. 5-ий та 7-ий гармонічні струми, що індукуються в роторі, можуть поєднуватись з утворенням 6-го гармонічного струму і аналогічним чином 12-го та 13-го, щоб отримати 12-й струм гармоніки і так далі для гармонік вищого порядку. Це призводить до збільшення нагріву та зменшенню коливального моменту. Повний ефект може бути зменшенням

ефективності до 90-95%, коли двигуни піддаються гармонійному спотворенню струму напруги живлення до 5% THD.

Основну частину силових трансформаторів складають ізольовані обмотки, встановлені на сталеві стрижні. З економічної точки зору, серцевик трансформатора призначений для роботи в насиченій області при високій щільності. Несинусоїдальний струм намагнічування має компонент третьої гармоніки. Таким струм містить основні та всі непарні гармоніки, з яких переважає третя гармоніка. При номінальній напрузі, третя гармоніка може становити до 10% фундаментальної та 150% номінальної напруги.

В мережах змінного струму згідно (IEEE Std C57.110-2008) втрати трансформатора можна охарактеризувати наступним чином:

- Втрати обмотки I^2R ;
- Втрати на обмотки за рахунок вихрових струмів;
- Змінні втрати.

В трансформаторах гармоніки можуть спричиняти підвищення звукового шуму. Окрім того, струмові гармоніки обумовлюють збільшення додаткових втрат, що призводить до збільшення основних втрат. Наявність гармонік струму та напруги також збільшує діюче значення струму. В *IEEE Std C57.110- 2008* пропонується ліміт *THD* для трансформаторів 5% та максимальних перенапруг стаціонарного стану до 10%.

Втрати з обмотки I^2R збільшуватимуться якщо значення діючого значення струму навантаження буде збільшуватись через наявність гармонічних компонентів. Окрім того, наближення гармонічних струмів збільшить опір змінного струму обмотки з тим самим ефектом на втрати обмотки.

Такий самий ефект втрат що був описаний для двигунів відноситься також для трансформаторів. Існує ризик утворення резонансу між індуктивністю трансформатора та ємнісними навантаженнями на гармонійних частотах.

Сердечники трансформаторів можуть утворювати вібрації на певних частотах гармонік викликаючи звуковий шум та нагрів. Обмотки трансформатора можуть впливати також на ефект близькості. Два близьких провідники, що несуть змінний струм в тому ж напрямку, утворюють більший магнітний потік в області, близькій до обох провідників, що спричиняє розподіл струму до більш віддалених ділянок цих двох провідників. Такий ефект зменшеної ефективної площі пропорційний частоті, тож для гармонік вищих порядків опір провідників буде також збільшуватись та спричинити додані втрати.

Якщо узагальнити усі впливи гармонік на трансформатори то отримуємо:

- збільшення втрат через несинусоїдальність струмів навантаження, які зростають пропорційно квадрату струму навантаження та квадрату частоти;
- збільшення втрат гістерезису;
- можливий резонанс між індуктивністю трансформатора та ємністю.

Якщо розглядати електронні пристрої, такі як випрямлячі або інвертори, то очевидно, що вони чутливі до точки перетину нульової напруги сигналу, можуть мати вплив гармонічних спотворень. Вплив на перетворювачі полягає у витісненні природної точки комутації. Гармоніки напруги діють на трансформатори живлення, пристрої управління та керування, характеристики вихідної напруги, сигнал вихідної напруги та допоміжні пристрої.

На рисунках 1.14 та 1.15 показано, як гармоніки напруги живлення витісняють точку природної комутації перетворювача. Контрольна апаратура тиристорів повинна забезпечувати додатковий запас безпеки для обліку цього явища: - якщо тиристори використовуються як випрямлячі, кут нагрівання повинен бути довшим, ніж кут, який знижує продуктивність обладнання. - у разі експлуатації в якості інвертора, необхідно забезпечити більший резерв, щоб уникнути помилок комутації, які можуть мати внутрішнє коротке замикання, що обмежує область регулювання.

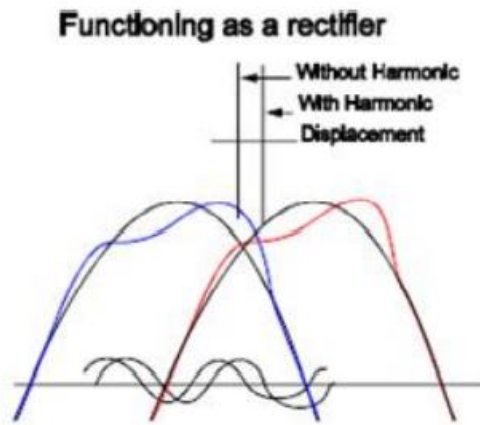


Рисунок 1.14 – Вплив гармонік на струм та напругу в електронних перетворювачах

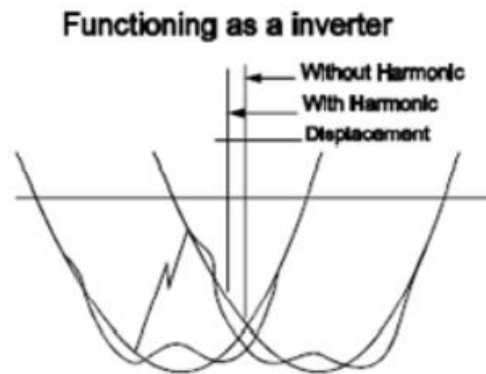


Рисунок 1.15 – Вплив гармонік на струм та напругу в електронних перетворювачах

Необхідно встановити зв'язок з загальним гармонічним спотворенням напруги, яка повинна розглядатися як нормально допустима, інакше необхідно визначити особливі умови. Загальне гармонічне спотворення напруги не повинно перевищувати 10%. Кожна індивідуальна гармоніка напруги не повинна перевищувати 5% до 13-ї гармоніки, а потім знизитися до 1% при 5000 Гц (основна частота 50 Гц).

Викривлення струму може спричинити неточну роботу індукційних вимірювачів. Гармонічні напруги або струми знизять здатність лічильника. Типові реакції на знижуючий ефект гармонік різних фазових кутів і амплітуд у котушках напруги та струму показані на рисунку 1.16.

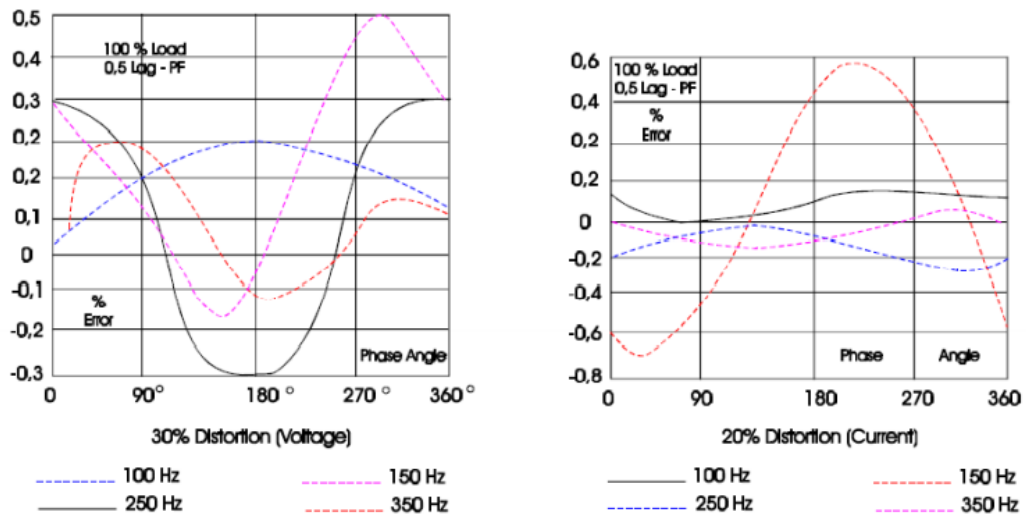


Рисунок 1.16 – Діаграми гармонічних напруг та струмів

Вплив гармонік на точність лічильників виявляється трьома способами:

- лічильники є частотними, причому негативна похибка збільшується з частотою. З того факту, що індуктивність котушки напруги збільшується, зменшується магнітне поле та обертаючий момент: - магнітні поля котушки напруги лічильника не є лінійними і містять деякі гармонічні компоненти за рахунок компенсаційних пристроїв. Вважається, що в будь-якому випадку буде розвиватися додатковий крутний момент, навіть якщо в розподільній мережі немає гармонік напруги та струму. Ці помилки є негативними. - лічильники не вимірюють компонент енергії через постійний струм. Однак ці негативні помилки є слабкими.

Абсолютні, середні або пікові вимірювальні прилади, які відкалібровані в діючому струмі, не підходять для вимірювання несинусоїдальних напруг та струмів. Зчитування вимірювального коефіцієнта усереднення може бути на 40% нижче дійсного значення струму через спотворену форму сигналу. Стандартний індикатор енергії кВт год, який звичайно використовується для вимірювання електроенергії, може бути високим до 6%, коли рівень гармонік високий.

Підсумовуючи вплив гармонік та інтергармонік на електричне обладнання можна сформулювати таблицю наступного вигляду:

Таблиця 1.3 – Зведена таблиця впливу гармонік на електричне обладнання

Обладнання	Вплив
Трансформатори	Підвищення звукового шуму Збільшення втрат на міді Збільшення втрат на сталі Збільшення значень діючого значення струму Перегрів Збільшення втрат гістерезису Резонанси Вихід з ладу
Електронні пристрої	помилки комутації
Генератори	Нагрів ротора Виробництво пульсуючого або коливального моментів
Двигуни	Моторні вібрації Втрати на сталі Втрати на міді Генерування звукових шумів Виникнення коливального крутного моменту Втрати асиметричні пульсації

1.5. Проблеми визначення інтергармонік

Як було зазначено, електротехнічні пристрої генерують у мережу завади, одними з яких є гармоніки – спектральні компоненти на частотах, які є цілими кратними компонентами основної частоти змінного струму. Однак окрім цих існують також інші – не цілі кратні, які називаються інтергармоніками. Зазвичай інтергармоніки спостерігають як одне з

додаткових навантажень до гармонік. Такими навантаженнями є статичні перетворювачі частоти, синхронні каскадні перетворювачі, прилади з регульованою швидкістю для індукційних чи синхронних двигунів, печі чи інше термічне обладнання, усі ці навантаження не будуть працювати з частотою синхронною до основної частоти.

Окрім стандартних проблем, які виникають при появі гармонік, перегрів чи зниження корисного ресурсу, виникає багато інших: значні термічні ефекти; низькочастотні коливання механічної системи, миготіння світла, завади сигналів керування і захисту, перевантаження високою частотою пасивного паралельного фільтру, телекомунікаційні завади, акустичні збурення, насичення трансформатора струму, синхронні коливання, коливання напруги, несправності систем дистанційного управління, помилкове спрацювання тиристорної апаратури, зменшення строку служби асинхронних двигунів. Ці явища можуть також статися якщо інтергармоніка має низьку амплітуду.

Гармоніки та інтергармоніки при аналізованні форми сигналу визначаються в умовах спектральних компонентів у квазіустійкому стані в певному діапазоні частот. Таблиця 1.4 надає їх математичні визначення [12].

Таблиця 1.4 – Спектральні компоненти форм сигналу (частота f)

Гармоніки	$f=nf_1$, де n – ціле число, що більше нуля
Компоненти постійного струму	$f=nf_1$, де $n=0$
Інтергармоніки	$f \neq nf_1$, де n
Субгармоніки	$0 < f_1 < f$

де f_1 – основна гармоніка.

Через наявність інтергармонік у мережі ускладнено моделювання і вимірювання спотворених сигналів, що пов'язано з низкою факторів: дуже низька зацікавленість у дослідженні у порівнянні з гармоніками; непостійність їх частот і амплітуд; змінність періодичності хвиль; дуже велика чутливість до явища спеткрального витоку. Однак через погіршення мереж викликане

інтергармоніками спостерігається збільшення інтересу серед промисловості і вчених до проблем якості електричної енергії.

Існує два основних механізми для виникнення інтергармонік. Перший - це генерація компонентів у бічних смугах частоти живлення та її гармонік в результаті зміни їх величин і/або фазових кутів. Це викликано швидким змінами струму в обладнанні та установках, що також може бути джерелом коливань напруги. Порушення створюються навантаженнями, які працюють у перехідному стані, як постійно, так і тимчасово, або, у багатьох інших випадках, коли відбувається амплітудна модуляція струмів і напруг. Ці заворушення мають багато в чому випадковий характер, залежно від змін навантаження, властивих процесам та устаткуванню, що використовується.

Другий механізм - це асинхронне перемикання (тобто не синхронізовано з частотою енергосистеми) напівпровідникових пристроїв у статичних перетворювачах. Типовими прикладами є циклоконвертори та перетворювачі з імпульсною широтною. Інтергармоніки, створені ними, можуть бути розташовані в будь-якому місці спектру по відношенню до гармонік напруги живлення [14].

У багатьох випадках обидва механізми відбуваються одночасно.

Інтергармоніки можуть генеруватися на будь-якому рівні напруги і переносяться між рівнями, тобто інтергармоніки, створені в системах високої напруги і середньої напруги, вбудовуються в систему низької напруги та навпаки. Їх величина рідко перевищує 0,5% напруги основної гармоніки, хоча можуть виникати і більш високі рівні в умовах резонансу.

1.6. Парні гармоніки й фактор асиметрії

Парні гармоніки (2,4,6...) струму генеруються лише в разі, якщо відповідні гармоніки є в кривій напруги мережі.

У двухтактній схемі компенсуються парні гармоніки підсилюваного струму. Гармоніки збігаються по фазі, але проходять в протилежних напрямках по полуобмотці трансформатора, внаслідок чого компенсуються їх магнітні потоки і зменшуються нелінійні спотворення підсилювача.

При паралельному з'єднанні робочих обмоток парні гармоніки струму, що протікають в кожній з обмоток, можуть замикатися по контуру, який утворений цими обмотками, не виходячи в мережу. Це можна пояснити тим, що парні гармоніки струму циркулюють в короткозамкненому контурі, що утворений секціями робочої обмотки, і не виходять в ланцюг навантаження. Наявність короткозамкнутого контуру в ланцюзі робочої обмотки призводить до зменшення швидкодії в порівнянні з послідовним з'єднанням секцій робочої обмотки.

Амплітуди послідовних парних гармонік струму зменшуються в порядку їх появи в геометричній прогресії. Непарні гармоніки зменшуються в тому ж самому порядку. Величина $1/k_r$ це коефіцієнт пригнічення парних гармонік струму в ланцюзі керування.

Постійна складова і амплітуди парних гармонік струму залежать тільки від коефіцієнтів при парних ступенях полінома, а амплітуди непарних гармонік - від коефіцієнтів при непарних ступенях.

У випадку коли $k_r = 0$, відповідає режимам роботи магнітного підсилювача з пригніченими парними гармоніками струму в ланцюгах управління він може виникати тоді коли ланцюг керування може бути шиною постійного струму, що отримує живлення від потужного джерела енергії. При цьому за допомогою магнітного підсилювача є можливість також вимірювати великі постійні струми.

Кожна непарна гармоніка однофазного змінного струму статора викликає парну гармоніку струму в обмотці збудження, а в свою чергу кожна парна гармоніка струму в обмотці збудження викликає наступну за порядком непарну гармоніку струму статора. Аналогічно, струм незмінного напрямку і парні гармоніки струму статора пов'язані з основною і непарними гармоніками відповідно струму обмотки збудження. За відсутністю ємності в ланцюзі амплітуди гармонік, зі зростанням їх порядкового номера, зменшуються.

Як було сказано раніше, головний чинник, що провокує виникнення парних гармонік – це асиметрія напруги або струму. Середньоквадратичне

значення компонентів парних гармонік та їх співвідношення до першої гармоніки не дають точний показник асиметрії між позитивними та негативними напівциклами сигналів напруги або струму. Саме тому, фактор асиметрії може використовуватись для характеристики різниці в пікових позитивних та негативних значеннях сигналу.

$$AF = \frac{v_{pp} - |v_{pn}|}{v_1} \quad (1.21)$$

В даній формулі AF це так званий коефіцієнт фактора асиметрії, V_{pp} – позитивне пікове значення сигналу напруги, V_{pn} – негативне пікове значення сигналу напруги та V_1 – номінальна напруга. Фактор асиметрії – функція значення фазового кута компонентів парної гармоніки. На рисунку 1.17 показано фактори асиметрії у вигляді даної функції. Як можна побачити з малюнку, більше значення гармоніки спричиняє більшу асиметрію у сигналах напруги. Також, значення фактору асиметрії максимальне у випадку якщо фазовий кут другої гармоніки дорівнює 90 градусів або 270 та мінімальне значення, що дорівнює 0% при кутах 0 та 180 градусів.

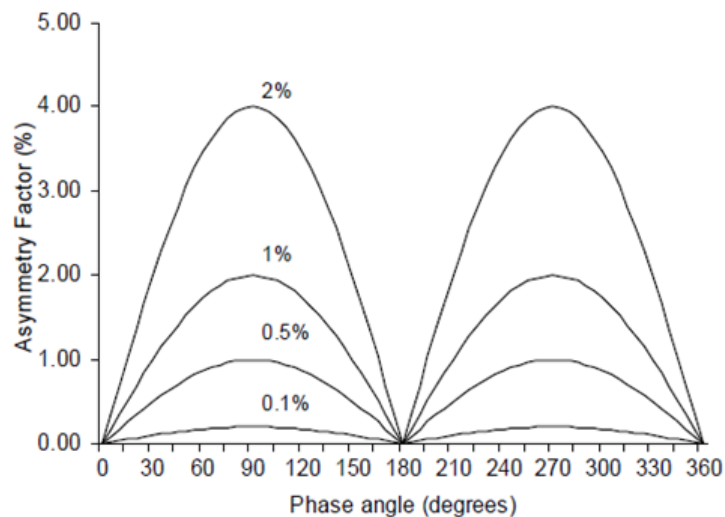


Рисунок 1.17 – фактор асиметрії у вигляді функції величини другої гармоніки та її фазового кута

Висновки до розділу

Оцінювання якості електроенергії посідає досить важливу позицію при забезпеченні надійності системи електропостачання, а також при взаємодії з нею навантажень. Зростання кількості таких навантажень з нелінійним та асиметричним навантаженням вимагає розвитку значної кількості методик визначення електромагнітної сумісності в електромережах.

В даному розділі було розглянуто основні причини виникнення асиметрії та гармонічних спотворень напруги в енергетичній системі та наслідки їх виникнення.

Основними негативними ефектами асиметрії, що негативно впливають на роботу електричної мережі та споживання електроенергії є:

- Асиметрія струму;
- Асиметрія напруги;
- Асиметрія напруги та струму що виникають одночасно.

Основними причинами виникнення асиметрії напруги в мережі навантаження є наявність парної частини гармонійної складової в сигналах напруг та зсуву фаз.

Також, основними видами наслідків виникнення гармонійних складових струму та напруги на елементи мереж змінного струму :

- Перевантаження в розподільних мережах через збільшення діючого значення струму;
- перевантаження в нульових (нейтральних) провідниках через підсумовування струмів вищих гармонік, кратних трьом, які генеруються однофазними нелінійними навантаженнями;
- перевантаження, вібрація і передчасне старіння генераторів, трансформаторів і електродвигунів, а також підвищений шум трансформаторів;
- перевантаження і передчасне старіння конденсаторів для підвищення коефіцієнта потужності;

- спотворення форми напруги живлення, яке може вплинути на «чутливі» навантаження;
- перешкоди в мережах зв'язку і телефонних лініях.

Після огляду іноземних джерел та стандартів якості електроенергії є необхідність введення такого показника якості як фактор асиметрії, що може допомогти в розумінні поняття асиметрії та визначення її наявності в мережі.

РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ АНАЛІЗУ СПОТВОРЕНЬ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ

2.1. Постановка питання

В даний час завдання контролю якості електроенергії є особливо актуальним, особливо в зв'язку зі світовою тенденцією по якісній зміні навантаження. Погіршення якості електроенергії, як вже було сказано раніше, відбувається як через збурення, викликані перехідними процесами (кидки і просідання напруги, імпульсні перешкоди), так і в сталих режимах (гармонійні спотворення, несиметричність, флікер).

З точки зору якості для нормальної роботи електричного обладнання, підключеного до мережі змінного струму, оптимальною є ідеально синусоїдальна форма напруги живлення, що показана на рис. 2.1.

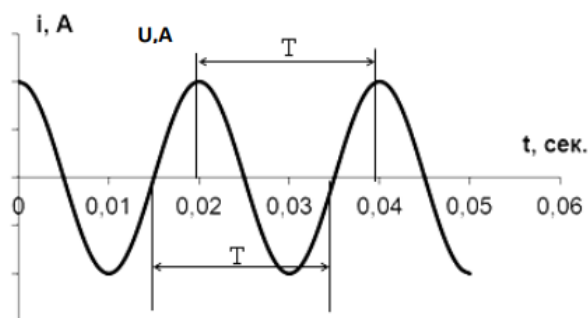


Рис. 2.1 – Синусоїдальна форма напруги живлення частотою 50 Гц

Проте при дослідженні форми кривої напруги живлення вона має явно виражену форму несинусоїдальності (рис. 2.2).

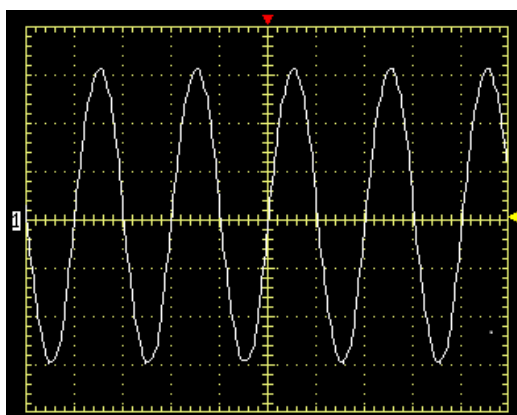


Рис. 2.2 – форма кривої синусоїдного струму в силовій мережі

Причини спотворення форми кривих залежать від навантаження, тобто споживачів. Ці навантаження споживають із мережі струм, крива якого

виявляється несинусоїдальною, а в багатьох випадках – і неперіодичною, у результаті виникають нелінійні спотворення кривої напруги.

Фізична сутність спотворення синусоїдальності змінної напруги полягає у виникненні режиму короткого замикання ланцюга змінного струму в інтервали комутації струму діодних та тиристорних плечей випрямляча, внаслідок чого на цих інтервалах відбуваються провали у кривій синусоїдальної напруги. Так як коливання напруги повторюються кожен напівперіод напруги живлення, то ця періодичність обмежує вентильну міцність випрямляча і спричиняє швидкому виходу їх з ладу. Крім того, ці коливання з'являються у кривій випрямленої напруги, впливаючи на електромагнітні процеси, що протікають у ланцюзі випрямленого струму. У трифазного трансформатора з трьома стержнями магнітопровід не тільки є нелінійним, але й несиметричним. Довжина магнітних шляхів крайніх і середньої фаз різняться в 1,9 раза. Такий факт є причиною того, що струм намагнічення у середній фазі менший за струм крайніх фаз.

Перетворювачі усіх типів генерують прямі і зворотні гармоніки струмів порядку $h = n \cdot p \pm 1$, де n – натуральний ряд чисел; p – число фаз перетворювача (3, 6, 12). Ці струми створюють гармоніки напруг, що змінюються залежно від навантаження перетворювача. Якщо навантаження незначне відносно загального навантаження системи електропостачання, то гармоніки напруги будуть незначними. Апарати з електричною дугою чи апарати, що використовують електричний розряд: дугові печі, зварювальні машини, люмінесцентні лампи (створюють нестабільні у часі гармоніки).

На даному етапі можливо розглянути два основних методи для аналізу спотворень сигналу в електричній мережі. Вейвлет-аналіз та метод перетворення Фур'є.

Вейвлет-аналіз являє собою особливий тип лінійного перетворення сигналів та відображаються цими сигналами фізичних даних про процеси і фізичні властивості природних середовищ і об'єктів. Базис власних функцій, за яким проводиться вейвлетного розкладання сигналів, володіє багатьма

специфічними властивостями і можливостями. Вейвлетного функції базису дозволяють сконцентрувати увагу на тих чи інших локальних особливостях аналізованих процесів, які не можуть бути виявлені за допомогою традиційних перетворень Фур'є і Лапласа. До таких процесів в геофізики відносяться поля різних фізичних параметрів природних середовищ. В першу чергу це стосується полів температури, тиску, профілів сейсмічних трас та інших фізичних величин. Принципове значення має можливість вейвлетов аналізувати нестационарні сигнали зі зміною компонентного змісту в часі або в просторі.

Вейвлети мають вигляд коротких хвильових пакетів з нульовим інтегральним значенням, локалізованих по осі аргументів (незалежних змінних), інваріантних до зсуву і лінійних до операції масштабування (стиснення та розтягування). За локалізацією в тимчасовому і частотному поданні вейвлети займають проміжне положення між гармонійними (синусоїдальними) функціями, локалізованими по частоті, і функцією Дірака, локалізованої в часі.

Періодичні несинусоїдні функції, що задовольняють умови Дирихле, можна розкласти у тригонометричний ряд Фур'є, тобто представити сумою гармонічних складових. Згідно з умовами Дирихле, така функція має кінцеве число відносних максимумів та мінімумів, а також точок розриву першого роду на деякому кінцевому інтервалі [17].

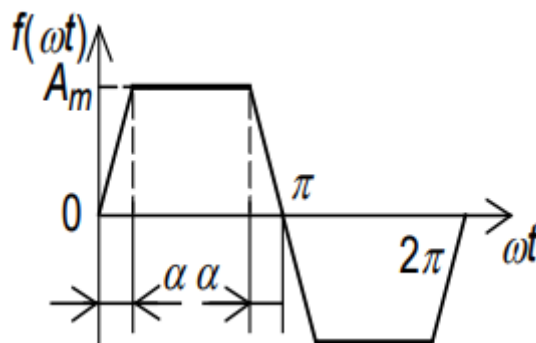


Рис. 2.3 – періодична функція трапецевидної форми

Згідно із досліджуваною формою спотворень, синусоїда більш близька до періодичної функції, яка має вигляд симетричної трапеції відносно осі ордината.

Надалі перейдемо до опису кожного з цих методів та їх порівняння.

2.2. Основи вейвлет-аналізу

Вейвлет – узагальнена назва математичних функцій певної форми, що локальні в часі та за частотою і в них всі функції виходять з однієї базової, масштабуючи її. Вейвлет застосовується в різних областях, у зв'язку, статистиці, математиці, фізиці, медицині, астрономії та ін. В даному випадку за допомогою вейвлет-аналізу проводиться спектральний аналіз наявності гармонічних спотворень в сигналі напруги та досліджувати її на вплив асиметрії.

Вейвлет-перетворення широко використовується для аналізу сигналів. Крім цього, воно знаходить велике застосування в області стиснення даних. Вейвлет-перетворення одновимірного сигналу - це його уявлення у вигляді узагальненого ряду або інтеграла Фур'є по системі базисних функцій, сконструйованих з материнського (вихідного) вейвлета $\psi(t)$, що володіє певними властивостями за рахунок операцій зсуву в часі (b) і зміни тимчасового масштабу (a).

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2.1)$$

Множник $\frac{1}{\sqrt{a}}$ забезпечує незалежність норми функції (2.1) від масштабуючого числа (a). Для заданих значень параметрів a і b функція $\psi_{ab}(t)$ і є вейвлет, що породжується материнським вейвлетом $\psi(t)$.

В якості прикладу можна привести вейвлет «Мексиканський капелюх» в часовій та частотній областях.

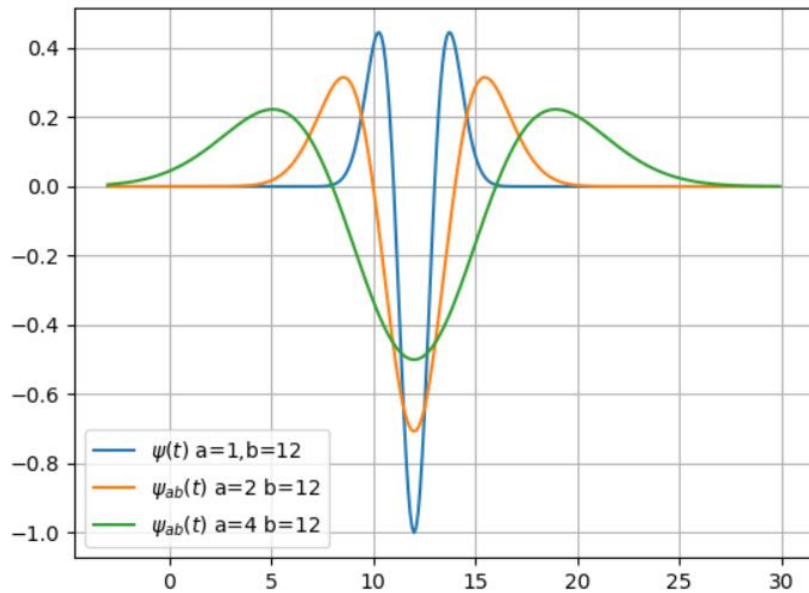


Рис. 2.4 – вейвлет «Мексиканський капелюх» для часової області

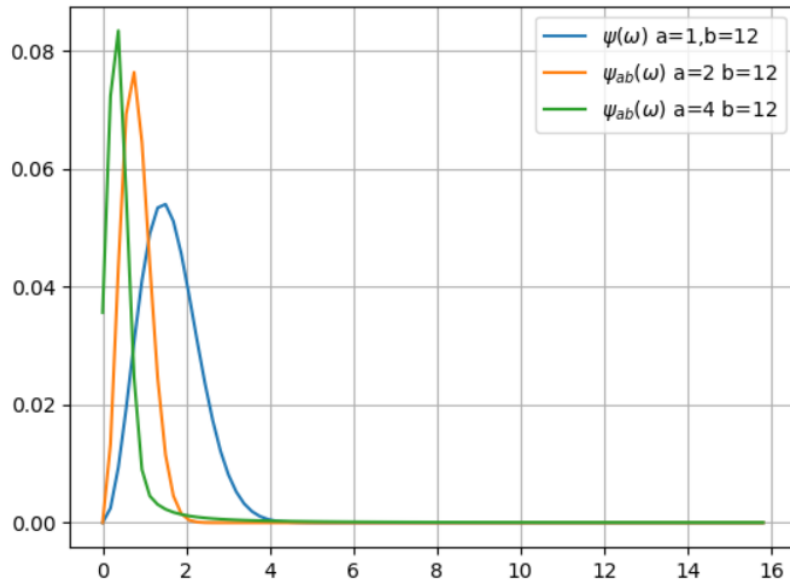


Рис. 2.5 – вейвлет «Мексиканський капелюх» для частотної області

2.2.1. Головні ознаки вейвлет-функцій

Для того щоб бути вейвлетами сімейство функцій має відповідати наступним ознакам:

1. Обмеженість. Квадрат норми функції має бути скінченним.

$$\|\psi\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(t)|^2 dt < \infty, \quad (2.2)$$

2. Локалізація. Вейвлет-перетворення на відміну від перетворення Фур'є використовує локалізовану вихідну функцію і в часі, і по частоті. Для цього достатньо, щоб виконувалися умови:

$$|\psi(t)| \leq C(1 + |t|)^{-1-\varepsilon} \text{ та } |S_\psi(\omega)| \leq C(1 + |\omega|)^{-1-\varepsilon} \text{ при } \varepsilon > 0. (2.3)$$

Наприклад, дельта-функція $\delta(t)$ і гармонійна функція не задовольняють необхідній умові одночасної локалізації в тимчасовій і частотній областях.

3. Нульове середнє. Графік вихідної функції має бути знакозмінним від нуля і мати нульову площу

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0. (2.4)$$

Рівність нулю площі функції $\psi(t)$, тобто нульового моменту, призводить до того, що Фур'є-перетворення цієї функції дорівнює нулю при i і має вигляд смугового фільтра. При різних значеннях (a) це буде набір смугових фільтрів.

Часто буває необхідно, щоб не тільки нульовий, а й всі перші n моментів дорівнювали нулю:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^n \psi(t) dt = 0. (2.5)$$

Вейвлети n -го порядку дозволяють аналізувати більш високочастотну структуру сигналу. Подавляючи його складові що повільно змінюються.

4. Подібність. Характерною ознакою ВП є його самоподібність. Всі вейвлети конкретного сімейства мають ту ж саму кількість осциляцій, що і материнський вейвлет, оскільки отримані з нього за допомогою масштабних перетворень (a) і зсуву (b) .

2.2.2. Неперервне Вейвлет-перетворення

Вейвлет-фільтр допустимо будувати на базі або дискретного (DWT), або неперервного перетворень. Неперервне (інтегральне) вейвлет-перетворення (НВП або *CWT - continuous wavelet transform*). Сконструємо базис за допомогою безперервних масштабних перетворень (a) і переносів (b) материнського вейвлета з довільними значеннями базисних параметрів a і b у формулі (2.1).

Тоді, за визначенням пряме (аналіз) і зворотне (синтез) НВП (тобто ПНВП і ОНВП) сигналу $S(t)$ запишуться так:

$$W_S(a, b) = (S(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (2.6)$$

$$S(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_S(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{dadb}{a^2}, \quad (2.7)$$

де C_ψ – нормуючий коефіцієнт,

ψ_{ab} – фур'є-перетворення вейвлета $\psi(t)$. Для ортонормованих вейвлетів $C_\psi = 1$.

З (2.6) випливає, що вейвлет-спектр $W_S(a, b)$ (*wavelet spectrum*, або *time-scale-spectrum* - масштабно-часовий спектр) на відміну від Фур'є-спектра (*single spectrum*) є функцією двох аргументів: перший аргумент a (тимчасової масштаб) аналогічний періоду осциляцій, тобто обернений частоті, а другий b - аналогічний зміщення сигналу по осі часу.

Следует отметить, что $W_S(a_0, b)$ характеризует временную зависимость (при $a = a_0$), тогда как зависимости $W_S(a, b_0)$ можно поставить в соответствие частотную зависимость (при $b = b_0$).

Якщо досліджуваний сигнал $S(t)$ являє собою одиночний імпульс довжиною τ_u , зосереджений в області $t = t_0$, його вейвлет-спектр буде мати найбільше значення в області точки з координатами $a = \tau_u, b = t_0$.

Способи подання (візуалізації) $W_S(a, b)$ можуть бути різними. Спектр є поверхнею в тривимірному просторі. Однак, часто замість зображення поверхні представляють її проекцію на площину ab з ізорівнями (або фігурами різних кольорів), що дозволяють простежити зміну інтенсивності амплітуд вейвлет-перетворень на різних масштабах (a) і в часі (b).

Крім того, зображують картини ліній локальних екстремумів цих поверхонь, так званий скелетон (*skeleton*), який виявляє структуру аналізованого сигналу.

2.3. Метод перетворення Фур'є

Електрична енергія з точки зору математичного аналізу є сигналом. Тобто, це є зміна фізичної величини, як струм або напруга, що представлена у вигляді деякої функції $f(t)$, де t – незалежна змінна будь-якого явища. Зазвичай сигнал це носій інформації, яку можна отримати лише після попередньої обробки сигналу. Способом обробки для аналогових та цифрових сигналів можуть бути процеси модуляції, згортки і т.д. Тобто, можна сказати, що отримати достовірну і правильну інформацію можливо тільки у випадку використання правильної математичної моделі сигналу. Власне кажучи, процедуру отримання інформації називають обробку сигналу.

Для опису електромагнітних процесів в електроенергетиці використовують гармонійні сигнали, тобто сигнали, основа яких це гармонійна модель, частотна або спектральна.

Для цього використовується аналіз Фур'є та його похідні. Безперервні функції завдання сигналу $f(t)$ це в основному математичні об'єкти, так як при зборі інформації про параметри електроенергії мають справу з дискретними значеннями.

У випадку традиційного варіанту ідентифікації спотворень, що був заснований на візуальному спостереженні коливань в часовій області вважливим питанням є наявність надійних шляхів класифікації спотворень. Також, такий варіант ідентифікації вимагає багато часу, що накладає обмеження на застосування його на практиці, особливо за необхідності аналізу досить великої кількості інформації. Також, додаткові ускладнення можуть виникати коли декілька видів перехідних процесів можуть відбуватись одночасно.

Оцінка ефективності наявних алгоритмів аналізу форми хвилі напруги та струму полягає в необхідності визначення точності та швидкодії. Дискретне перетворення Фур'є, що є досить широко використовуваним методом - це математична процедура, що використовується для визначення гармонічного, або частотного, складу дискретних сигналів. ДПФ є однією з найбільш

розповсюджених і потужних процедур цифрової обробки сигналів. ДПФ дозволяє аналізувати, перетворювати і синтезувати сигнали такими способами, які неможливі при неперервній (аналоговій) обробці.

Відомо, що найважливішим засобом аналізу стаціонарних неперервних сигналів є перетворення Фур'є неперервного часу (*CNFT*). При цьому сигнал розкладається в базис різночастотних синусоїд. Кількість даних функцій досить велика. Коефіцієнти перетворень можна знайти шляхом обчислення скалярного добутку сигналу з комплексними експонентами:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-i\omega x} dx, (2.8)$$

де $f(x)$ – сигнал, $F(\omega)$ – перетворення Фур'є сигналу.

З практичної точки зору неперервне перетворення Фур'є має досить значну кількість недоліків. Наприклад, для отримання перетворення на одній частоті має бути відома вся часова інформація, тобто повинна бути відома прогнозна поведінка сигналу. По-друге, не всі сигнали є стаціонарними. Пік сигналу в часовій області розповсюджується по всій частотній області його Фур'є-перетворення. Для зменшення часу що необхідний для проведення аналізу розроблений алгоритм швидкого перетворення Фур'є. На даний момент він є основним алгоритмом як серед алгоритмів спектрального оцінювання, так і в інших областях обробки інформації. Проте алгоритми Фур'є мають декілька джерел методичних похибок, що призводять до зниження точності результатів гармонійного аналізу та їх спотворень. Для обходу таких недоліків вводиться віконне перетворення Фур'є.

$$STFT_f(\omega, b) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x) \cdot e^{-i\omega x} w(x - b) dx, (2.9)$$

В даному рівнянні застосовується операція множення сигналу на вікно перед застосуванням перетворення Фур'є. Вікном $w(x - b)$ – є локальна функція, яка зсувається вздовж часової осі для обчислення перетворення в декількох позиціях b . Перетворення стає залежним від часу, і в результаті виходить частотно-часовий опис сигналу. В якості вікна вибирається функція

Гаусса і в цьому випадку зворотне перетворення теж буде виконуватися з використанням віконної функції Гаусса. Також використовуються і інші вікна, залежно від конкретної задачі. Недолік *STFT* полягає в тому, що у його обчисленні використовується фіксоване вікно, яке не може бути адаптоване до локальних властивостей сигналу.

Таким чином, з позицій точного представлення перетворення Фур'є довільних сигналів і функцій можна відмітити низку його недоліків:

- перетворення Фур'є навіть для однієї заданої частоти вимагає знання сигналу не тільки в минулому, але і в майбутньому, що є теоретичною абстракцією;

- в умовах практично неминучого обмеження числа гармонік або спектра коливань точне відновлення сигналу після прямого і зворотного перетворень Фур'є теоретично (і тим більше практично) неможливе, зокрема через появу ефекту Гіббса;

- базисною функцією при розкладанні в ряд Фур'є є гармонічне (синусоїдальне) коливання, яке математично визначено в інтервалі часу від $-\infty$ до $+\infty$ і має незмінні в часі параметри;

- чисельне інтегрування в часовій області від $-\infty$ до $+\infty$ у прямому перетворенні Фур'є (ППФ) і в частотній області від 0 до $+\infty$ у зворотному перетворенні Фур'є (ЗПФ) викликає великі обчислювальні труднощі;

- окремі особливості сигналу (наприклад, розриви або піки) викликають незначні зміни частотного образу сигналу на всьому інтервалі частот від $-\infty$ до $+\infty$, які «розмазуються» по всій частотній осі, що робить їх виявлення по спектру практично неможливим;

- єдиним засобом представлення швидких змін сигналів, таких як піки або перепади, є різке збільшення числа гармонік, які впливають на форму сигналу і за межами локальних особливостей сигналу;

- за складом вищих складових спектра практично неможливо оцінити місце розташування особливостей на часовій залежності сигналу і їх характер;

— для нестационарних сигналів (а саме такими є осцилограми електроенергетичних сигналів в мережах 0,38/0,22 кВ) труднощі прямого і зворотного перетворення Фур'є (і, відповідно, швидкого перетворення Фур'є (ШПФ)) багаторазово зростають.

Невеликі розриви (сходінки) на синусоїдальному або будь-якому плавно змінному сигналі важко виявити в його Фур'є-спектрі, бо вони створюють вищі гармоніки дуже малої амплітуди [19]. Спектр таких сигналів містить ледь помітні високочастотні складові спектра, за якими розпізнати локальну особливість сигналу, і тим більше її місце і характер, практично неможливо.

Головними недоліками алгоритмів Фур'є є обмеженість частотного дозволу і недостатня точність оцінки частоти окремих гармонійних компонент. У першому випадку - це роздільна здатність поділу двох спектральних складових з близькими частотами, а в другому - правильність визначення частоти обумовленою гармонійної компоненти. Для підвищення точності проведення ШПФ застосовується ряд додаткових математичних операцій. Так, для виключення ефекту розсіювання [20] (коли довжина тимчасової вибірки не дорівнює періоду аналізованої функції) буде синхронізуватися частоти дискретизації з частотою досліджуваного сигналу, доповнення нулями вихідної вибірки аналізованого сигналу [21] або застосовуються тимчасові або спектральні вікна [22]. Ефективним засобом зменшення спектральних витоків є також застосування віконних функцій відповідно до інтерполяційних алгоритмів [21].

Однак ці способи не забезпечують збільшення частотного розширення. Застосування тимчасових або спектральних вікон дозволяє зменшити ефект розсіювання внаслідок погіршення частотного дозволу (у зв'язку з виключенням частини інформації про аналізовану функцію), а при доповненні вихідної вибірки нулями збільшується вибіркковість оцінювання частот вузько смугових спектральних піків внаслідок зменшення нерівномірності

амплітудно-частотної характеристики і, відповідно, похибок, пов'язаних з її нерівномірністю.

2.4. Порівняння наявних методів аналізу спотворень сигналу напруги

Надалі розглянемо вейвлет-перетворення моделей сигналів з різними видами спотворень. На рисунку 2.6 показана модель короткочасного зникнення змінної напруги в низьковольтній мережі.

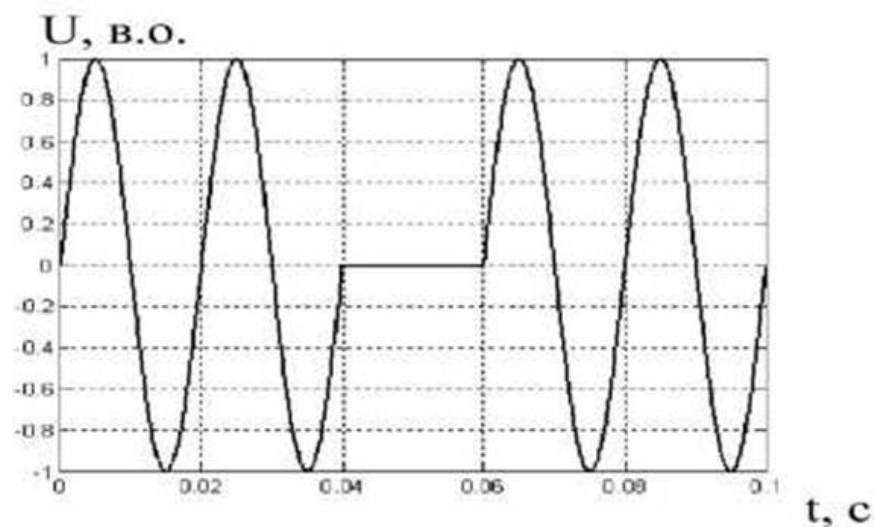


Рисунок 2.6 – Короткочасне зникнення змінної напруги

На спектрі Фур'є цього сигналу можна побачити лише наявність основної гармоніки що має частоту 50 Гц, проте інформація про відсутність сигналу в періоді немає. Спектр Фур'є показаний на рисунку 2.7

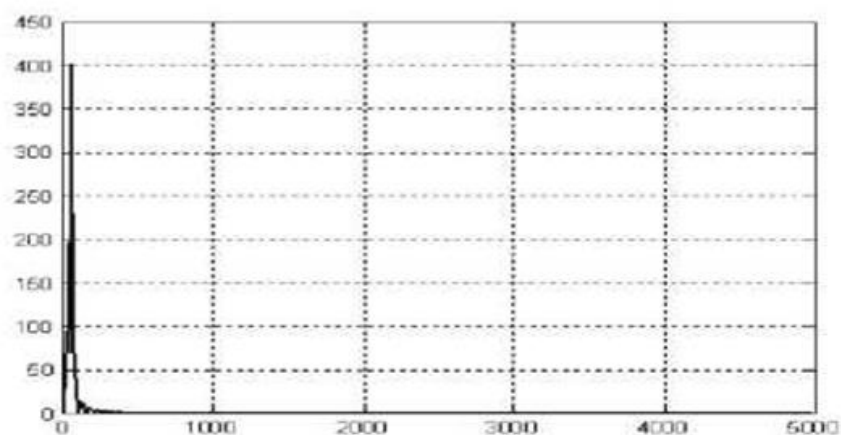


Рисунок 2.7 - спектр сигналу Фур'є з короткочасним зникненням змінної напруги

На вейвлет-спектограмі існує незаповнена область, що відповідає провалам напруги. До того ж, значення вейвлет-коефіцієнтів на даному відрізку нульове. Двовимірна та тривимірна вейвлет-спектограма даного сигналу зображена на рисунку 2.8.

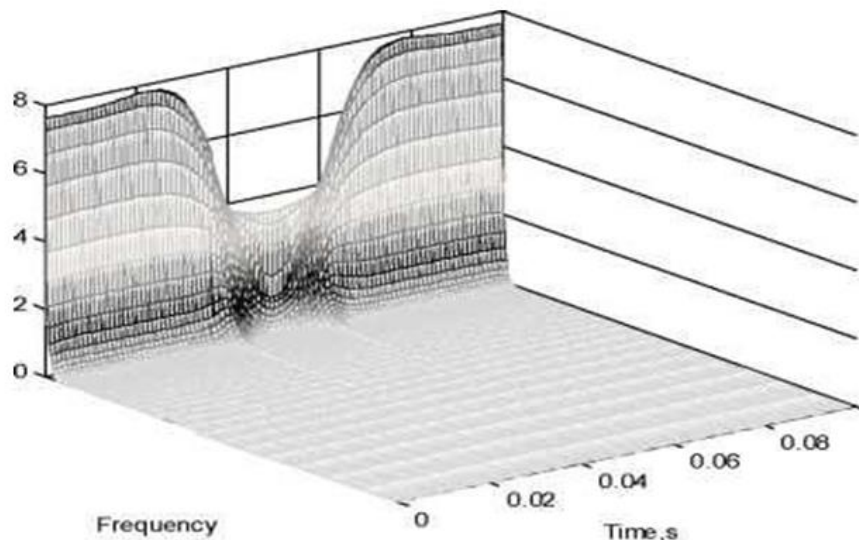


Рисунок 2.8 - Двовимірна та тривимірна вейвлет-спектограма сигналу з короткочасним зникненням змінної напруги

Далі перейдемо до наступного виду спотворення – тимчасового відхилення амплітуди змінної напруги від базового значення. В даному випадку маємо зниження амплітуди на 50% протягом одного періоду. Спектр Фур'є даної кривої (рис. 2.9) аналогічний спектру, що зображений на рисунку 2.10.

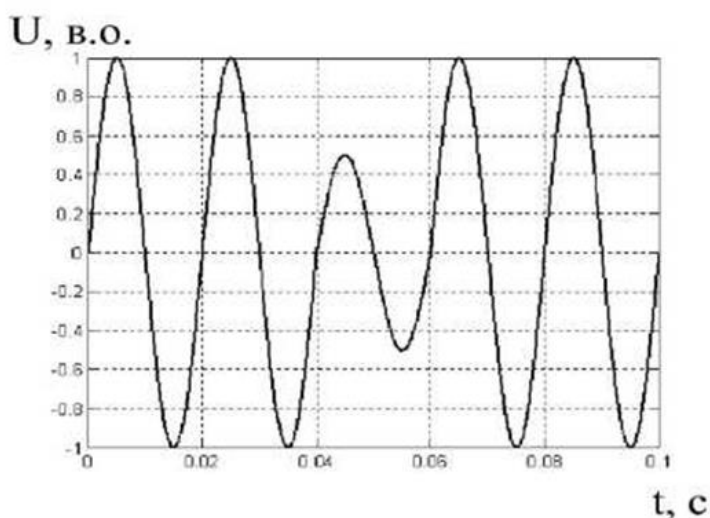


Рисунок 2.9 - Зниження амплітуди протягом одного періоду на 50%

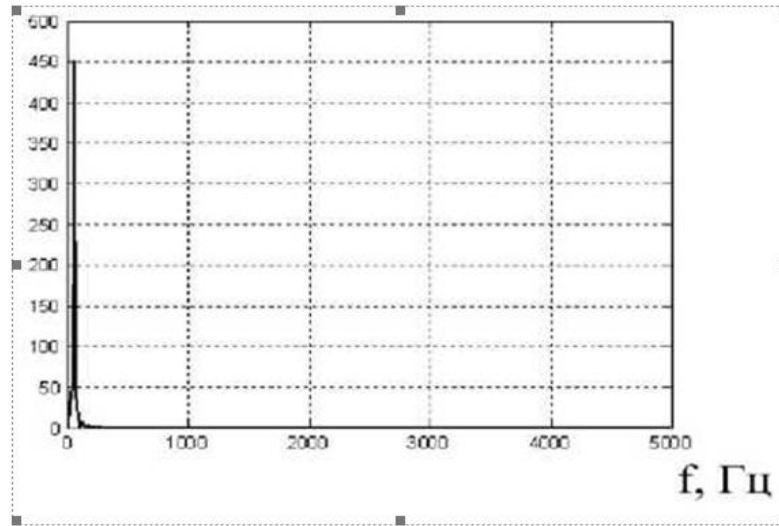


Рисунок 2.10 - Фур'є-спектр сигналу зі зниженням амплітуди протягом одного періоду на 50%

На рисунку 2.11 показана вейвлет-спектрограма сигналу, де чітко помітне зниження рівня сигналу та його розташування на часовій осі і тривалість.

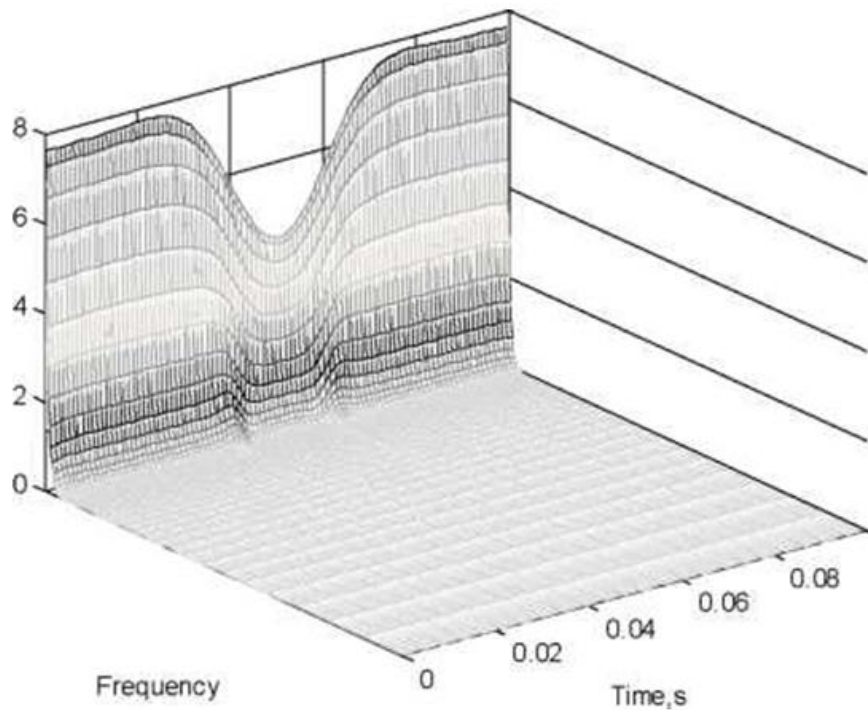


Рисунок 2.11 - Тривимірна вейвлет-спектрограма сигналу зі зниженням амплітуди протягом одного періоду на 50%

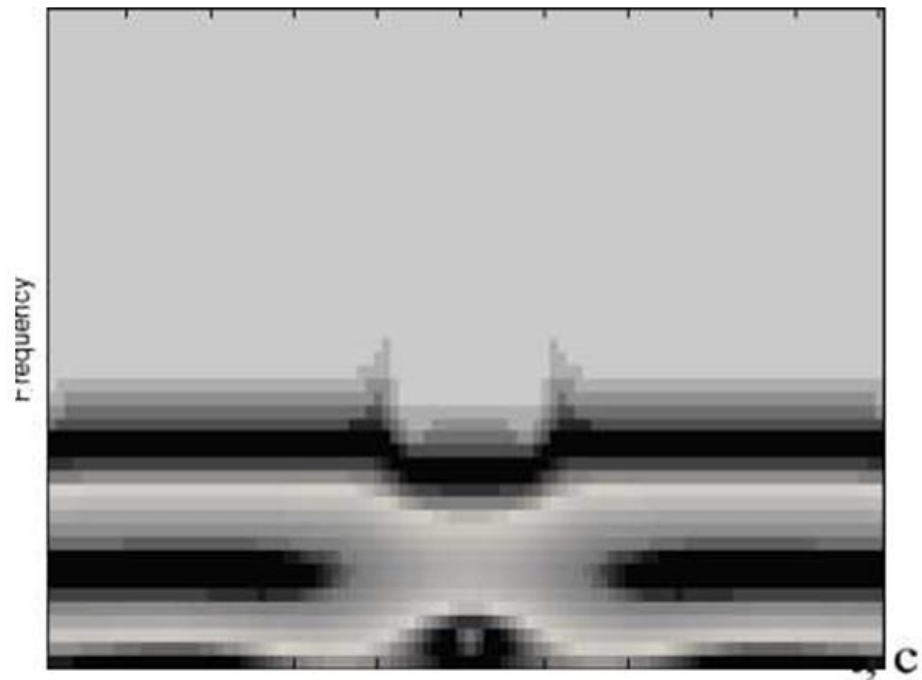
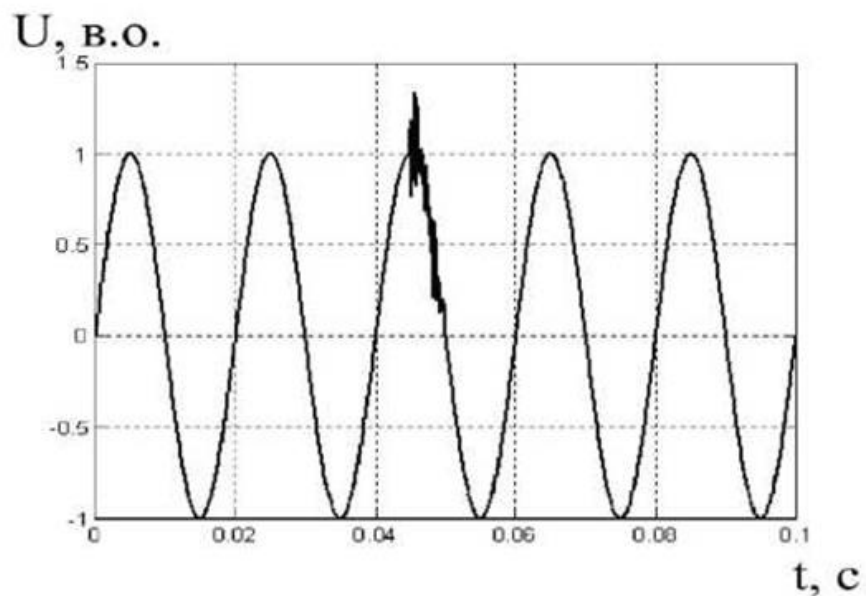


Рисунок 2.11 – Двовимірна вейвлет-спектрограма сигналу зі зниженням амплітуди протягом одного періоду на 50%

Спотворення змінної напруги, що спричинено короткочасним високочастотним імпульсом показано на рисунку 2.12.



Рисунку 2.12 - Короткочасний високочастотний імпульс

На спектрі сигналу Фур'є наявність цих спотворень не відображається, що можна побачити на рисунку 2.13.

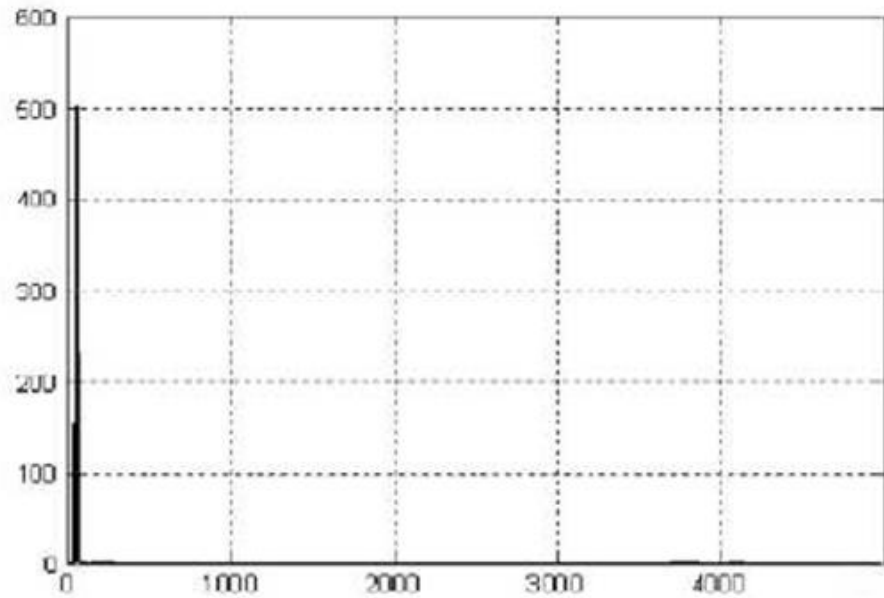


Рисунок 2.13 - спектр сигналу Фур'є з короткочасним високочастотним імпульсом
 Найбільш чітке розташування високочастотного імпульсу може бути визначено на вейвлет-спектрограмі, що зображена на рисунку 2.14 та 1.15

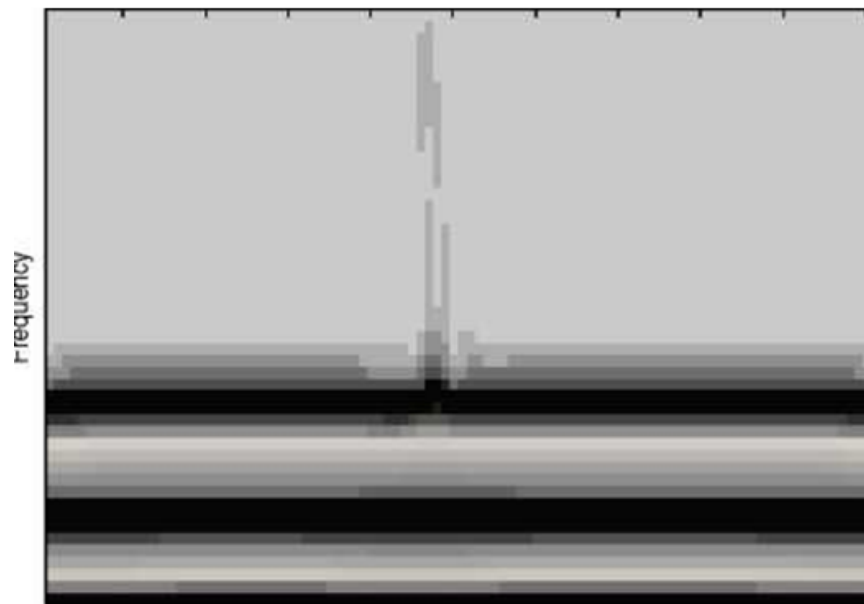


Рисунок 2.14 - Двовимірна вейвлет-спектрограма сигналу з короткочасним високочастотним імпульсом

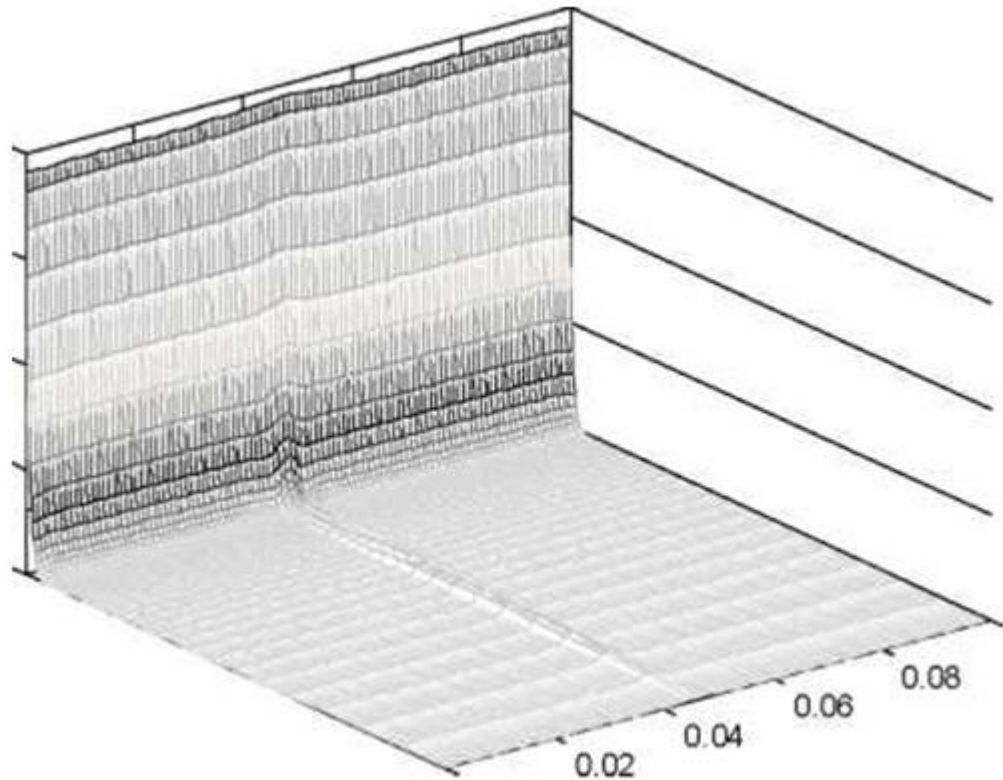


Рисунок 2.15 - Тривімірна вейвлет-спектрограма сигналу з короткочасним високочастотним імпульсом

Як бачимо з рисунків, всі види спотворень напруги можуть бути ідентифіковані за допомогою вейвлет-аналізу. Тобто, вейвлет-перетворення дозволяє виділити і визначити з високою точністю різні спотворення напруги у будь-якій ситуації.

Також між концепцією гармонік Фур'є і масштабом вейвлета дійсно існує взаємозв'язок. Головне в цій взаємозв'язку - зворотна пропорційність власної частоти і масштабу. Крім цього, зменшуючи масштаб, ми збільшуємо смугу пропускання спектру вейвлета.

За рахунок зміни масштабу (збільшення а призводить до звуження Фур'є-спектра функції), вейвлети здатні виявляти відмінність в характеристиках на різних шкалах (частотах), а за рахунок сдвіга- проаналізувати властивості сигналу в різних точках на всій досліджуваній інтервалі. Тому, при аналізі нестационарних сигналів, за рахунок властивості локальності вейвлетов, отримують суттєву перевагу перед перетворенням Фур'є, яке дає тільки

глобальні відомості про частоти (масштаби) аналізованого сигналу, так як використовується при цьому система функцій (комплексна експонента або синуси і косинуси) визначена на нескінченному інтервалі.

2.5. Методологічне проведення гармонійного аналізу при використанні вейвлет-перетворень

Відомі два основних підходи для визначення гармонік за допомогою вейвлет-аналізу. Перший заснований на коротко масштабному аналізі (КМА) з використанням банку вейвлет-фільтрів на першому кроці і застосуванні НВП підгруп на другому кроці, другий - на використанні комплексного вейвлет-перетворення або НВП.

Перший підхід ідентифікації гармонік в електричних мережах на основі використання комбінації дискретного вейвлет-перетворення (ДВП) і НВП щодо кількісної оцінки частотних гармонік, їх амплітуди і фази.

На першому кроці виконана декомпозиція частотного спектра сигналу на два під діапазону на основі ДВП за допомогою функцій Добеши високих порядків. На другому кроці застосовано НВП до ненульовим під діапазону. Даний метод успішно компенсує частотні недосконалості фільтра при використанні банку вейвлет-фільтрів.

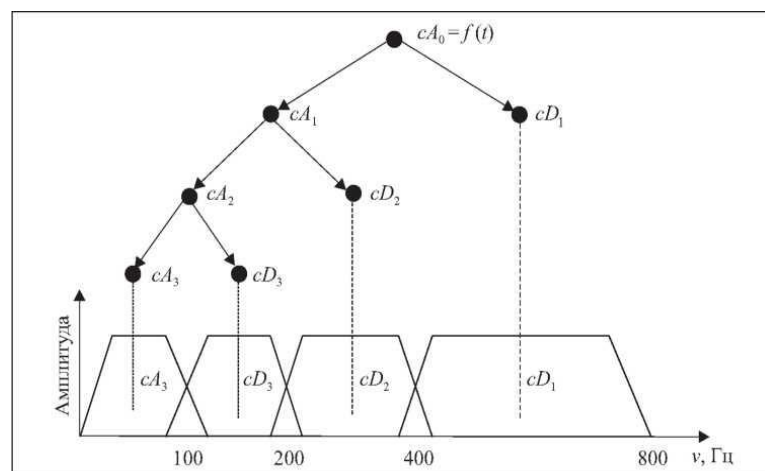


Рисунок 2.16 - Нерівномірні частотні лінії КМА

У більш пізніх роботах описано застосування вейвлет-аналізу для удосконалення амплітудно-частотних характеристик фільтрів, аналізу

субгармонік, з використанням трапецеїдальної комплексної вейвлет-функції, різних видів материнських вейвлетів.

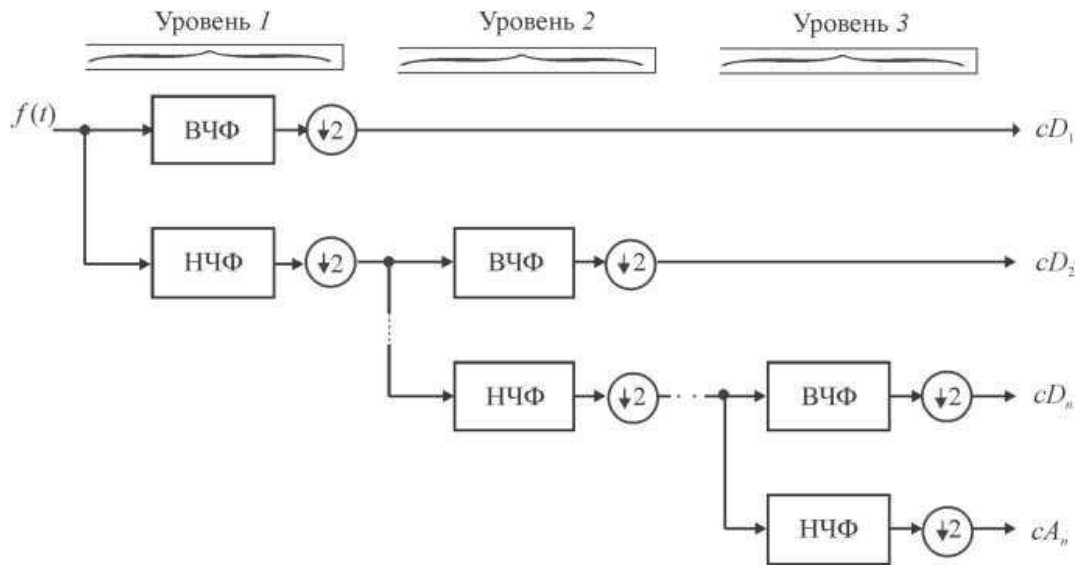


Рисунок 2.17 - Дерево вейвлет-розкладання за алгоритмом Малла: ВЧФ і НЧФ - високочастотний і низькочастотний фільтри; (&) - Децимація (зменшення числа коефіцієнтів у два рази)

Швидке вейвлет-перетворення за алгоритмом Малла [28] представляє собою так званий коротко масштабний аналіз (рисунок 11). При переході з рівня 0 на рівень 1 вхідна функція $f(t)$. За допомогою ВЧФ і НЧФ розділяється на частотні смуги, що характеризуються апроксимуючими та деталізованими коефіцієнтами. При переході з рівня 1 на рівень 2 (і так далі) апроксимуючі коефіцієнти в свою чергу поділяються за допомогою фільтрів на низькочастотні (апроксимуючі) і високочастотні (деталізуючі) коефіцієнти (рисунок 2.16) [29].

За даним алгоритмом можна визначати середньоквадратичні величини струму, напруги та потужності [30, 31], однак він не дозволяє визначати середньоквадратичні значення струму, напруги та потужності окремих гармонійних компонент. Тому в даний час для проведення гармонійного аналізу використовується пакетне вейвлет перетворення [32], за допомогою якого, на відміну від алгоритму Малла декомпозиції на всіх рівнях піддаються і апроксимуючі і деталізуючі коефіцієнти (рисунок 2.17).

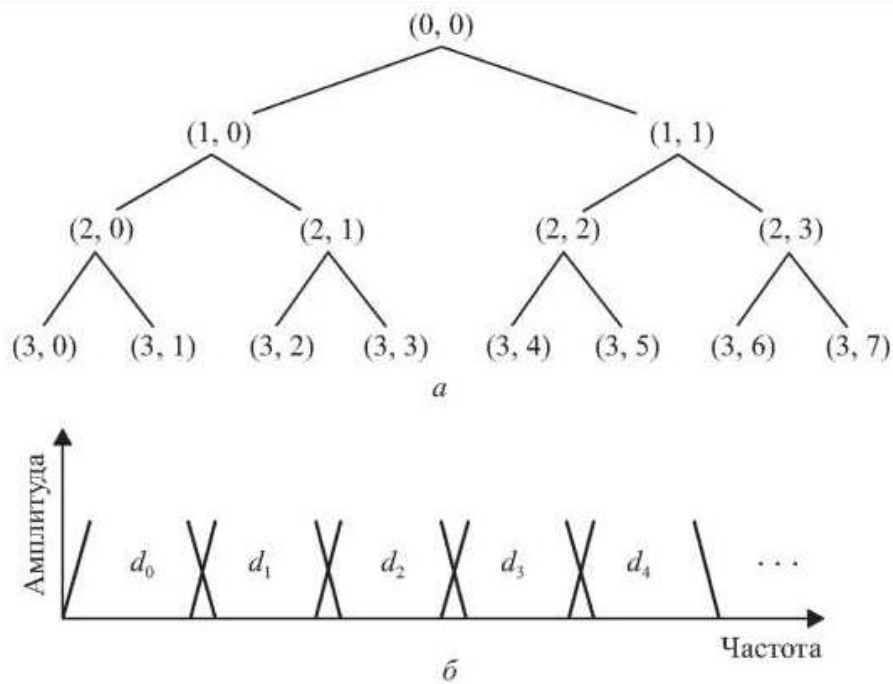


Рисунок 2.18 - Дерево декомпозиції та частотних ліній

Можливості застосування пакетного вейвлет-перетворення для проведення частотного гармонійного аналізу показані у багатьох роботах. Зокрема, для підвищення швидкодії, точності визначення гармонік, виключення спектральних витоків використовуються різні способи, засновані на перетворенні Гільберта [33], використанні різного роду фільтрів [34], комбінації декількох методів [35]. В [36] визначено контрольно-вимірювальна апаратура для вимірювання гармонік та інтергармонік електричних струмів і напруг в системах електропостачання. В якості методу вимірювань пропонується використання ДПФ із застосуванням тимчасового вікна Хеннінг при втраті синхронізації. При цьому тривалість тимчасового інтервалу виміру повинна дорівнювати десяти періодам основної частоти при прямокутному вікні зважування. Не виключаються й інші принципи аналізу, такі як застосування банків цифрових фільтрів або вейвлет-перетворень.

На відміну від перетворення Фур'є вейвлет-аналіз при вимірюванні частотно-тимчасових змін спектральних компонент інформаційного сигналу має інший частотно-тимчасовий період.

Висновки до розділу

В даному розділі було розглянуто питання методик дослідження спотворень в електричній мережі. Розробка способу аналізу спотворень електричної енергії в мережі на теперішній час є актуальною, так як проблема зниження якості електроенергії в енергетиці стоїть досить гостро.

Низька якість електроенергії сильно впливає на техніко-економічні показники підприємств, а саме:

- Зниження термінів роботи електроустановок;
- Перебої в електропостачанні;
- Прискорення старіння конденсаторів та ізоляції проводів;
- Порушується робота пристроїв автоматики;
- Вихід з ладу асиметричних двигунів та ін.

Тож, було запропоновано розглянути наявні можливі методи дослідження спотворень в електричних мережах та їх визначення.

Для прикладу розглядається два можливих методи дослідження, а саме, метод швидкого перетворення Фур'є та вейвлет-аналіз.

Як показують дослідження, вейвлет-перетворення має низку переваг перед Фур'є-перетворенням, зокрема при ідентифікації спотворень несинусоїдальних режимів розподільних мереж 0,38/0,22 кВ. Однак основним недоліком вейвлет перетворення є його відносна складність в порівнянні з перетворенням Фур'є.

РОЗДІЛ 3 ВИМІРЮВАННЯ ТА АНАЛІЗ ГАРМОНІЧНИХ СПОТВОРЕНЬ

3.1. Гармонійні та інтергармонійні групи та підгрупи за формами напруги та струму

Гармонійна група визначається [7] як групування гармонійної складової та прилеглих спектральних ліній до нього протягом часового вікна згідно з рівнянням (3.1), отримані із застосуванням дискретного аналізу Фур'є на зразках форми напруги або струму.

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+1}^2 + \frac{C_{k-5}^2}{2}, (3.1)$$

де $G_{g,n}$ - середньоквадратичне значення значення гармонічної групи порядку n ;

C_k - амплітуда компонента Фур'є від порядок k , будучи $k = N * n$ ($N = 10$, величина часового вікна в системі 50 Гц).

Гармонійна підгрупа порядку n визначається як групування складової порядку n та їх дві безпосередньо сусідні спектральні складові (рівняння 3.2).

$$G_{g,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+1}^2, (3.2)$$

Перше з двох визначень використовується лише тоді оцінюються гармоніки, тоді як друге визначення - застосовується при оцінці гармонік та інтергармоній окремо, як у випадку з оцінкою інтергармоній виробництво обладнання.

Згідно з цим визначенням, гармоніка другого порядку група охоплює частотні бункери від 75 до 125 Гц, тоді як гармонічна підгрупа другого порядку охоплює лише частотні бункери від 95 до 105 Гц. На рисунку 3.1 показано групування спектральних ліній для групи гармонік і підгрупа другого порядку.

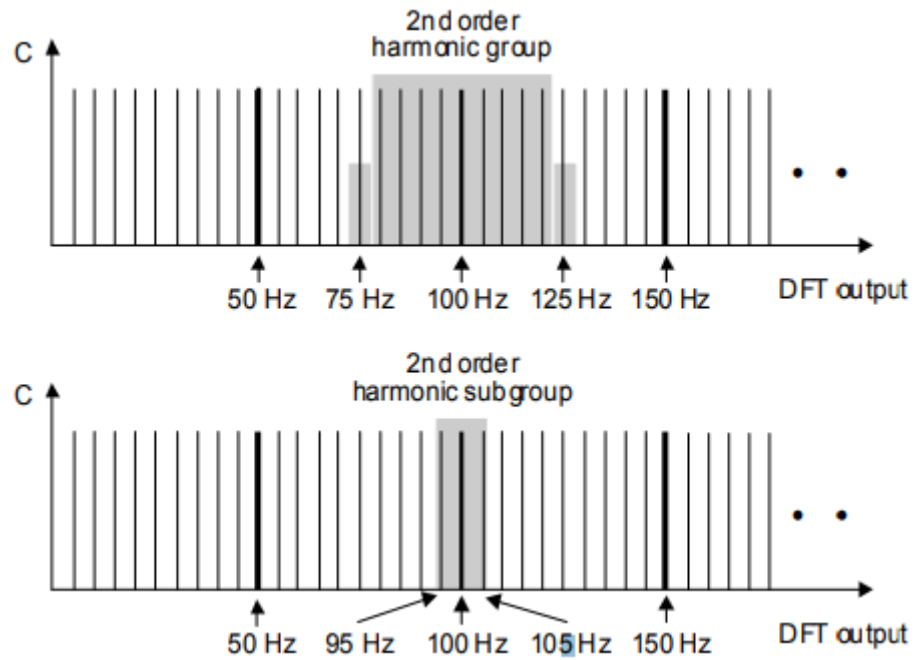


Рис. 3.1 Групування вихідних бункерів дискретного Фур'є аналізу для гармонійної групи та підгрупи другого порядку

З іншого боку, групи та підгрупи інтергармонік визначаються як групування спектральних ліній за допомогою рівнянь наступних рівнянь:

$$G_{ig,n}^2 = \sum_{i=1}^9 C_{k+1}^2, \quad (3.3)$$

$$G_{isg,n}^2 = \sum_{i=2}^8 C_{k+1}^2, \quad (3.3)$$

де $G_{ig,n}^2$ та $G_{isg,n}^2$ - середньоквадратичні значення інгармонічних груп та міжгармонічних підгруп n -го порядку відповідно.

3.2. Програмна реалізація вимірювання та моніторингу гармонічних спотворень за допомогою аналізу Фур'є на Python 3 та Matplotlib

Matplotlib — бібліотека на мові програмування Python для візуалізації даних двовимірною 2D графікою (3D графіка також підтримується). Matplotlib є конфігурованим пакетом, який надає можливості, подібні до MATLAB.

Спектральний аналіз періодичних функцій базується в знаходженні амплітуди та фази j k гармоніє ряду Фур'є. Завдання, обернене до спектрального аналізу, називається спектральним синтезом.

Тож, гармонійним аналізом називають розкладання функції $f(t)$, заданої на відрізку $[0, T]$ в ряд Фур'є або в обчисленні коефіцієнтів Фур'є за формулами.

Гармонійним синтезом називають отримання коливань складної форми шляхом підсумовування їх гармонійних складових (гармонік).

Програмна реалізація:

```
from random import randint
```

```
from scipy.integrate import quad
```

```
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
import numpy as np
```

```
T = np.pi
```

```
w = 2 * np.pi / T
```

```
def analyze(t):
```

```
    if t < np.pi:
```

```
        p = np.cos(t)
```

```
    else:
```

```
        p = -np.cos(t)
```

```
    return p
```

```
def calc_coefficient_a(t, k, w):
```

```
    if t < np.pi:
```

```
        z = np.cos(t) * np.cos(w * k * t)
```

else:

$z = -np.cos(t) * np.cos(w * k * t)$

return z

def calc_coefficient_b(t, k, w):

if t < np.pi:

$y = np.cos(t) * np.sin(w * k * t)$

else:

$y = -np.cos(t) * np.sin(w * k * t)$

return y

$a = []$

$b = []$

$c = 4$

$g = []$

$m = np.arange(0, c, 1)$

$q = np.arange(0, 2 * np.pi, 0.01)$

$a = [round(2 * quad(calc_coefficient_a, 0, T, args=(k, w))[0] / T, 3) \text{ for } k \text{ in } m]$

$b = [round(2 * quad(calc_coefficient_b, 0, T, args=(k, w))[0] / T, 3) \text{ for } k \text{ in } m]$

$F1 = [a[1] * np.cos(w * 1 * t) + b[1] * np.sin(w * 1 * t) \text{ for } t \text{ in } q]$

$F2 = [a[2] * np.cos(w * 2 * t) + b[2] * np.sin(w * 2 * t) \text{ for } t \text{ in } q]$

$F3 = [a[3] * np.cos(w * 3 * t) + b[3] * np.sin(w * 3 * t) \text{ for } t \text{ in } q]$

$plt.figure()$

```

plt.title("класичний гармонійний аналіз \n при  $t < \pi$   $f(t) = \cos(t)$  при  $t \geq \pi$ 
 $f(t) = -\cos(t)$ ")
plt.plot(q, F1, label='1 гармоніка')
plt.plot(q, F2, label='2 гармоніка')
plt.plot(q, F3, label='3 гармоніка')
plt.xlabel("Время t")
plt.ylabel("Амплитуда A")
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
F = np.array(a[0] / 2) + np.array([0 * t for t in q - 1])
for k in np.arange(1, c, 1):
    F = F + np.array([a[k] * np.cos(w * k * t) + b[k] * np.sin(w * k * t) for t
in q])

```

```

plt.figure()
P = [analyze(t) for t in q]
plt.title("класичний гармонійний синтез")
plt.plot(q, P, label='f(t)')
plt.plot(q, F, label='F(t)')
plt.xlabel("час t")
plt.ylabel("f(t), F(t)")
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)

```

```

plt.show()

```

Щодо фільтрації аналогових сигналів, то під фільтрацією аналогових сигналів передбачається виведення корисного сигналу з його сумішню зі спотворюючим сигналом. Найбільш поширений тип фільтрації - частота фільтрації. Якщо відома область частот корисного сигналу, достатньо виділити цю область та подавити області, що зайняті шумом.

В програмній реалізації відбувається фільтрація шляхом синтезу вихідного сигналу, що представлений підрахунками вектора, потім до цього сигналу додається шум за допомогою генератора випадкових чисел та формується вектор з підрахунками спотвореного сигналу.

Програмна реалізація фільтрації аналогових сигналів:

```
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from numpy.fft import rfft, irfft
from numpy.random import uniform
k=np.arange(0,128,1)
T=np.pi;z=T/128; m=[t*z for t in k]
def f(t):
    if t<np.pi:
        p=np.cos(t)
    else:
        p=-np.cos(t)
    return p
def FH(x):
    if x>=0:
        q=1
    else:
        q=0
    return q
v=[f(t) for t in m]
vs= [f(t)+np.random.uniform(0,0.5) for t in m]
plt.figure()
plt.title("фільтрація аналогових сигналів \n вікно вихідної спотворюючої
функції")
plt.plot(k,v, label='Вікно вихідної функції pi')
plt.plot(k,vs,label='Вікно спотвореної функції pi')
```

```

plt.xlabel("Отсчёты -k")
plt.ylabel("Амплитуда A")
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
al=2
fs=np.fft.rfft(v)
g=[fs[j]*FH(abs(fs[j])-2) for j in np.arange(0,65,1)]
h=np.fft.irfft(g)
plt.figure()
plt.title("Фильтрация аналоговых сигналов \n Результат фильтрации")
plt.plot(k,v,label=вікно вихідної функції pi')
plt.plot(k,h, label=вікно результату шpi')
plt.xlabel("відлік -k")
plt.ylabel("амплітуда A")
plt.legend(loc='best')
plt.grid(True)
plt.show()

```

Програмна реалізація вимірювання гармонік та асиметрій у формі сигналу напруги:

```

from random import randint
from scipy.integrate import quad
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np

T = np.pi
w = 2 * np.pi / T
a = []
b = []
c = 4
g = []

```

```
m = np.arange(0, c, 1)
q = np.arange(0, 2 * np.pi, 0.01)
```

```
def analyze(t):
```

```
    if t < np.pi:
```

```
        p = np.cos(t)
```

```
    else:
```

```
        p = -np.cos(t)
```

```
    return p
```

```
def calc_coefficient_a(t, k, w):
```

```
    if t < np.pi:
```

```
        z = np.cos(t) * np.cos(w * k * t)
```

```
    else:
```

```
        z = -np.cos(t) * np.cos(w * k * t)
```

```
    return z
```

```
def calc_coefficient_b(t, k, w):
```

```
    if t < np.pi:
```

```
        y = np.cos(t) * np.sin(w * k * t)
```

```
    else:
```

```
        y = -np.cos(t) * np.sin(w * k * t)
```

```
    return y
```

```
def calc(coefficient):
```

```
    mass = []
```

```
    for k in m:
```

```
        mass.append(round(2 * quad(coefficient, 0, T, args=(k, w))[0] / T, 3))
```

```
return mass
```

```
a = calc(calc_coefficient_a)
```

```
b = calc(calc_coefficient_b)
```

```
F1 = [a[1] * np.cos(w * 1 * t) + b[1] * np.sin(w * 1 * t) for t in q]
```

```
F2 = [a[2] * np.cos(w * 2 * t) + b[2] * np.sin(w * 2 * t) for t in q]
```

```
F3 = [a[3] * np.cos(w * 3 * t) + b[3] * np.sin(w * 3 * t) for t in q]
```

```
plt.figure()
```

```
plt.title("Графік тижня")
```

```
x = [i + 1 for i in range(0, 50)]
```

```
y = [randint(0, 20) for i in range(0, 50)]
```

```
plt.plot(x, y, marker="o", c="g")
```

```
plt.xlabel("День")
```

```
plt.ylabel("")
```

```
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

3.3. Вимірювання гармонійних спотворень

Розглянемо обладнання, що було розроблене з метою аналізу та вимірювання гармонік та інтергармонік в електричній мережі відповідно до стандарту [24].

Вимірювальне обладнання складається з трьох перетворювачів напруги, плати збору даних, фазового контуру та комп'ютера. В ньому використаний програмний модуль для вимірювання гармонік та асиметрій у формі сигналу напруги.

Для аналізу гармонік обрано частоту дискретизації 3200 Гц. Сам аналіз проводиться з використанням синхронізованих прямокутних вікон дискретизації з десятьма циклами, величиною основної частоти 200 мс. з застосуванням аналізу Фур'є.

Вихідні пакети аналізу Фур'є з роздільною здатністю 5 Гц згруповані [7] для обчислення гармонійних та інтергармонійних груп та підгруп у вхідному сигналі. Окрім того, індивідуальні частотні компоненти з кроком 5 Гц окремо реєструються для поглибленого аналізу групи та підгрупи гармонік другого порядку.

З іншого боку, для аналізу асиметрії у формі хвилі напруги позитивні та негативні пікові значення реєструються в десяти послідовних циклах вікна вибірки, і для цього базового інтервалу вимірювань обчислюється величина фактору асиметрії. Для оцінки цього фактору використовуються однакові інтервали часу агрегації.

Дані взято для розподільчої мережі будівлі що живиться від трифазної мережі, трансформатора 12 кВ / 380 В. Великий відсоток навантаження складається з освітлення, комп'ютерів та іншого технологічного обладнання.

Як приклад, на рисунках 3.2-3.5 показана загальна гармоніка групи спотворення (THDG), середньоквадратичне значення величини гармонійних груп та підгруп другого порядку та коефіцієнт асиметрії (AF), усі виражаються у відсотках від основного компоненту, вимірюваного протягом тижня та з використанням 10- хвилинного інтервалу часу агрегації.

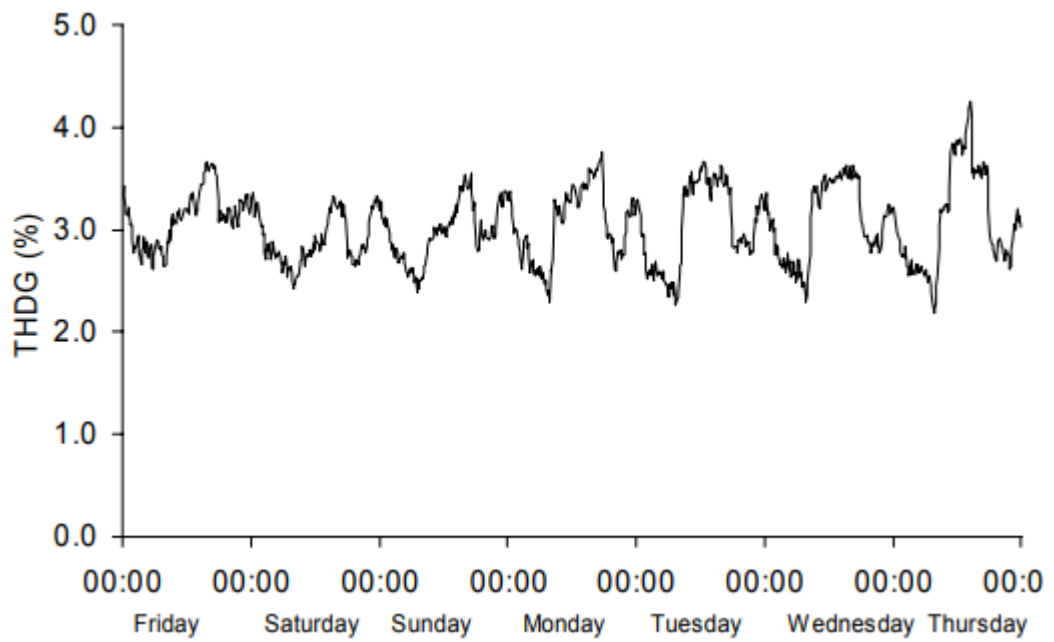


Рис. 3.2 – Група повних гармонійних спотворень

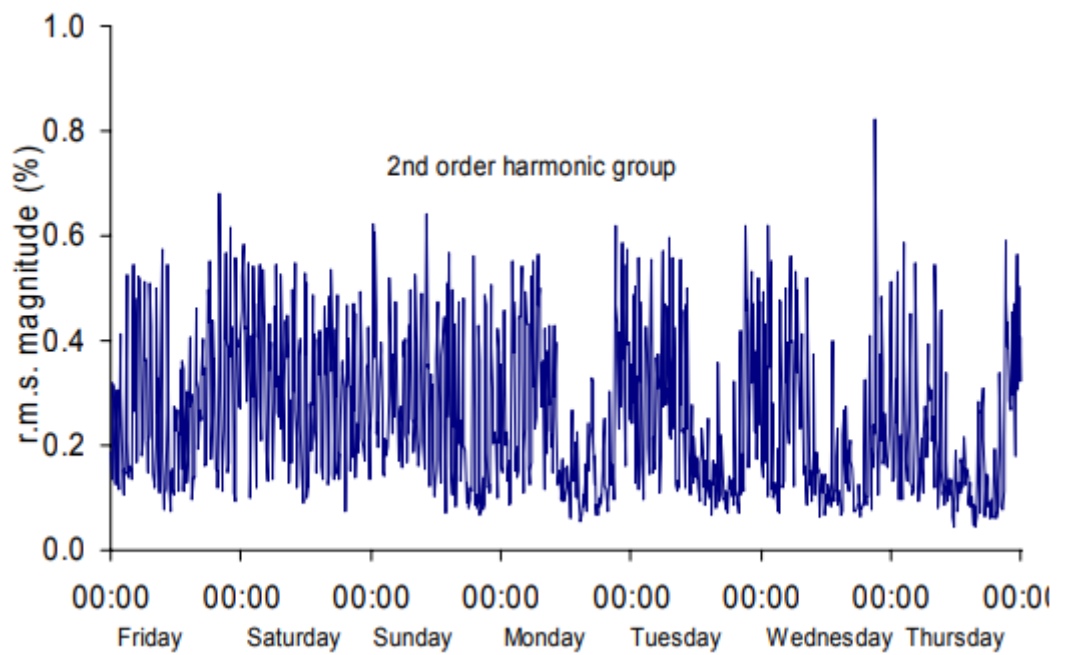


Рис. 3.3 – Середньоквадратичне значення відхилення гармонійних груп другого порядку

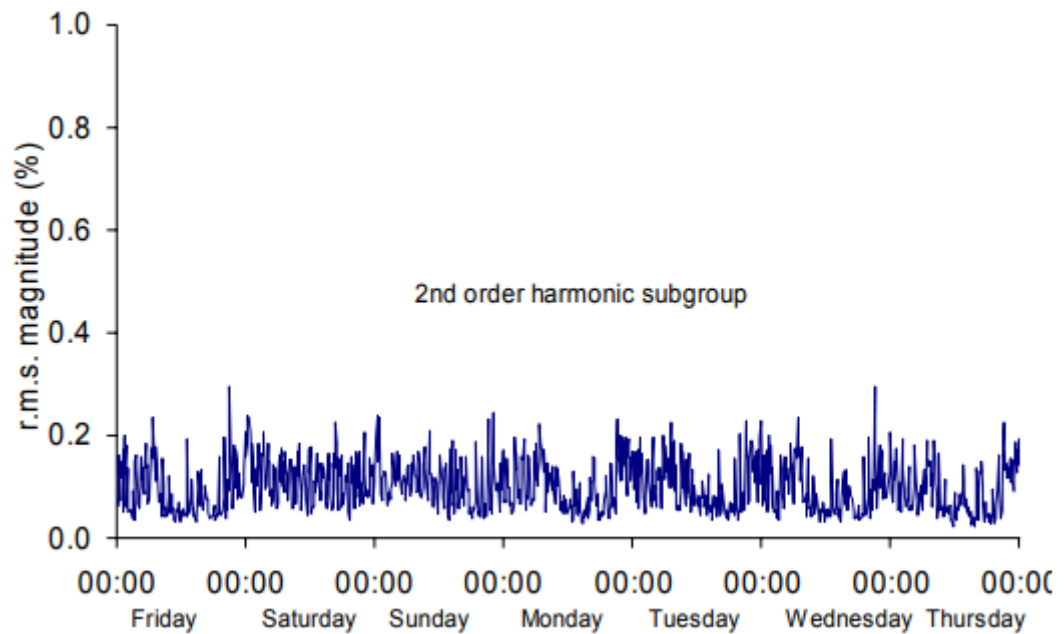


Рис. 3.4 – Середньоквадратичне значення відхилення гармонійних підгруп другого порядку

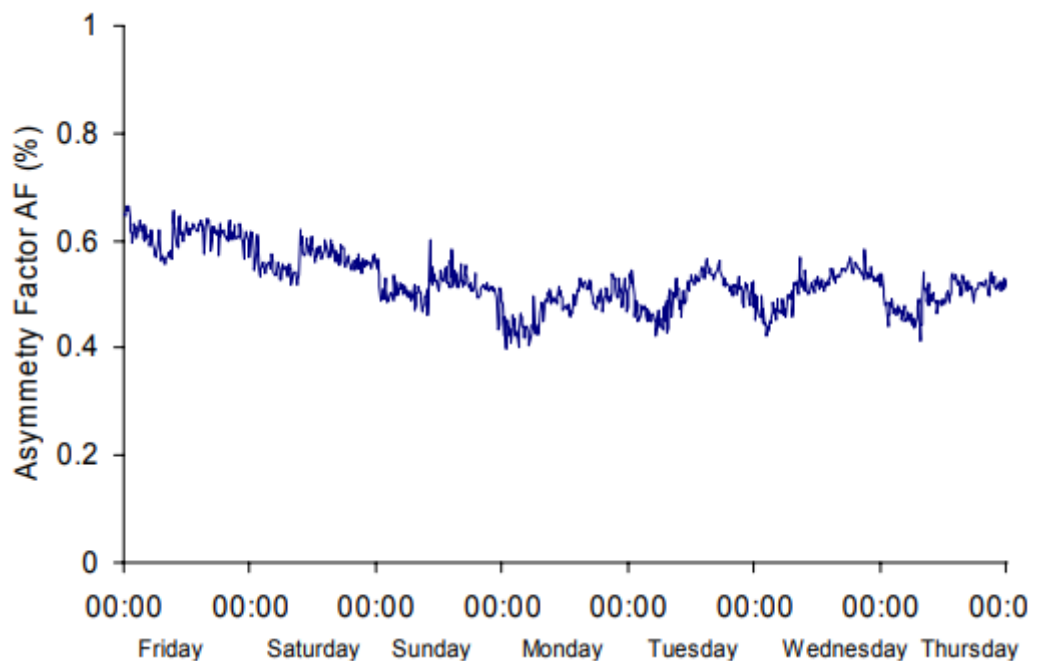


Рис. 3.5 – зміна фактору асиметрії

Як бачимо, група повних гармонійних спотворень показує значення з максимальними величинами протягом дня і мінімальними значеннями вночі, де гармонійна група п'ятого порядку є домінуючою. Максимальне та мінімальне значення, що записані під час моніторингу становили 4,24% та 2,19% відповідно, із середнім значенням 2,19% від основного компонента.

Далі, група гармонік другого порядку за формою хвилі, що групує спектральні лінії від 75 до 125 Гц, має значення з мінімальним значенням 0,044% до максимальним значенням 0,82%, та з середнім значенням 0,25% основного компонента тоді як підгрупа гармонік другого порядку (спектральні лінії 95, 100 та 105 Гц) демонструє той самий характер, що і група гармонік, в діапазоні від 0,023% до 0,29%, а середнє значення 0,1%, в половині випадків. Це означає, що споживання спектральних ліній входить до гармонік другого порядку, але поза діапазоном підгрупи гармонік другого порядку мають аналогічний порядок.

На рисунку 3.5 показано розвиток коефіцієнта асиметрії у формі хвилі напруги з використанням 10-хвилинних інтервалів агрегації. Як можна побачити, величина фактора асиметрії показує зміну параметрів аз часом, подібну до груп повних гармонійних спотворень, з піковими значеннями, що відповідають приблизно піковим величинам у гармонійній групі та підгрупі другого порядку. Діапазон значень фактора асиметрії протягом періоду спостереження коливається від 0,39% до 0,66%, із середнім значенням 0,52% від основного компонента.

На рисунках 3.6-3.8 показані функції щільності ймовірності (*pdf*), кумулятивні функції щільності (*cdf*) величин середньоквадратичних значень гармонічної групи та підгрупи другого порядку та коефіцієнта асиметрії з даними, що показані на рисунках 3.2-3.5.

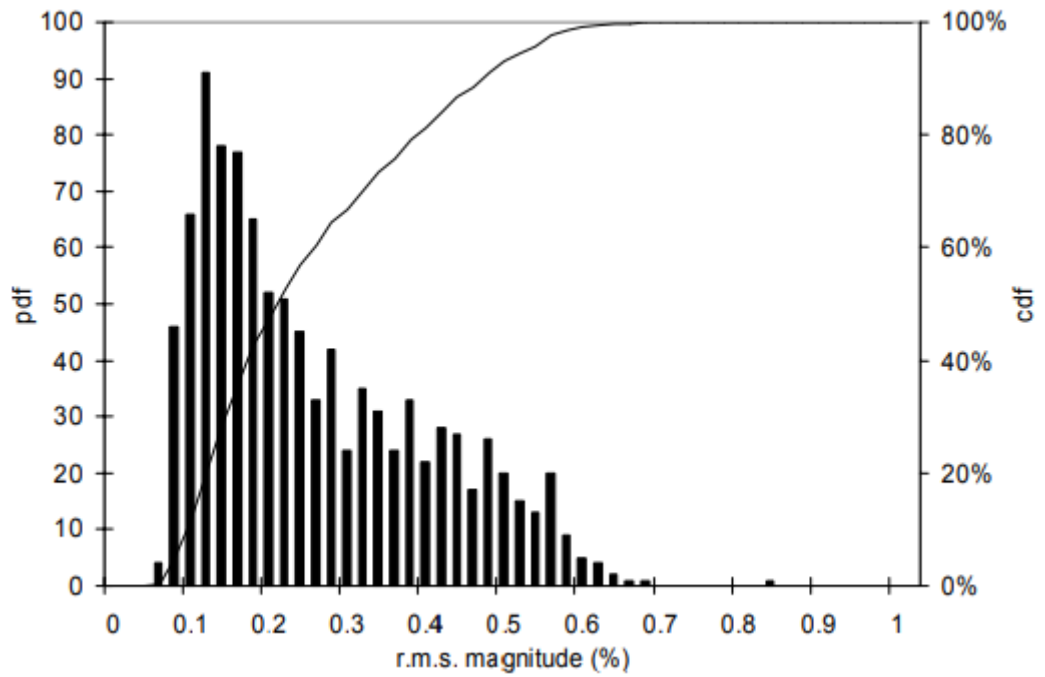


Рис. 3.6 – функції груп щільності pdf та cdf величин середньоквадратичної гармонійної групи другого порядку

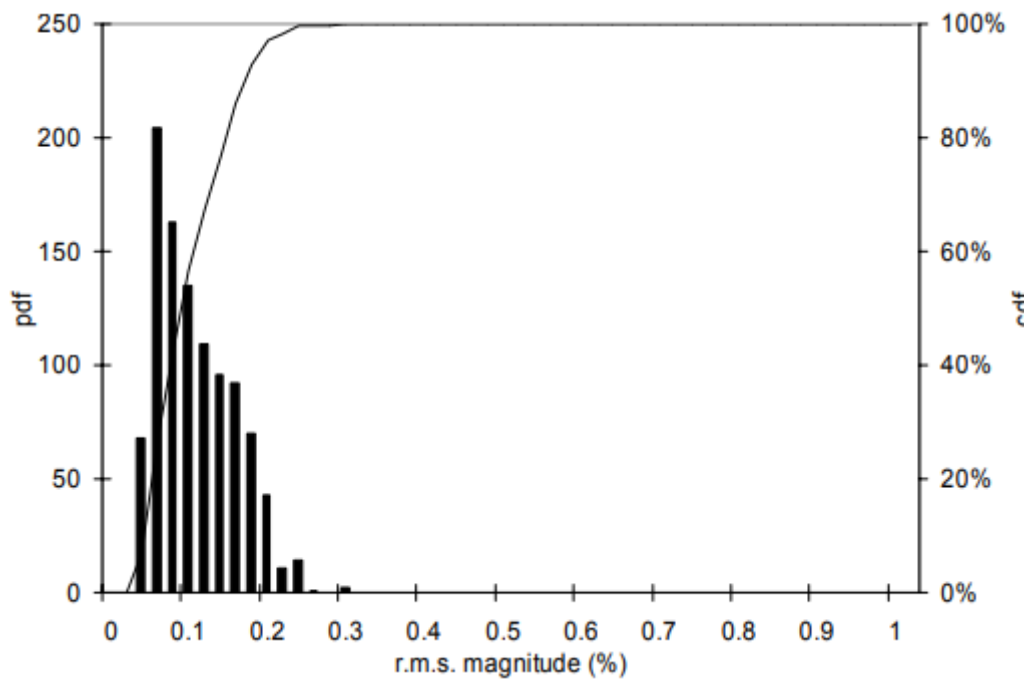


Рис. 3.7 – функції груп щільності pdf та cdf величин середньоквадратичної гармонійної підгрупи другого порядку

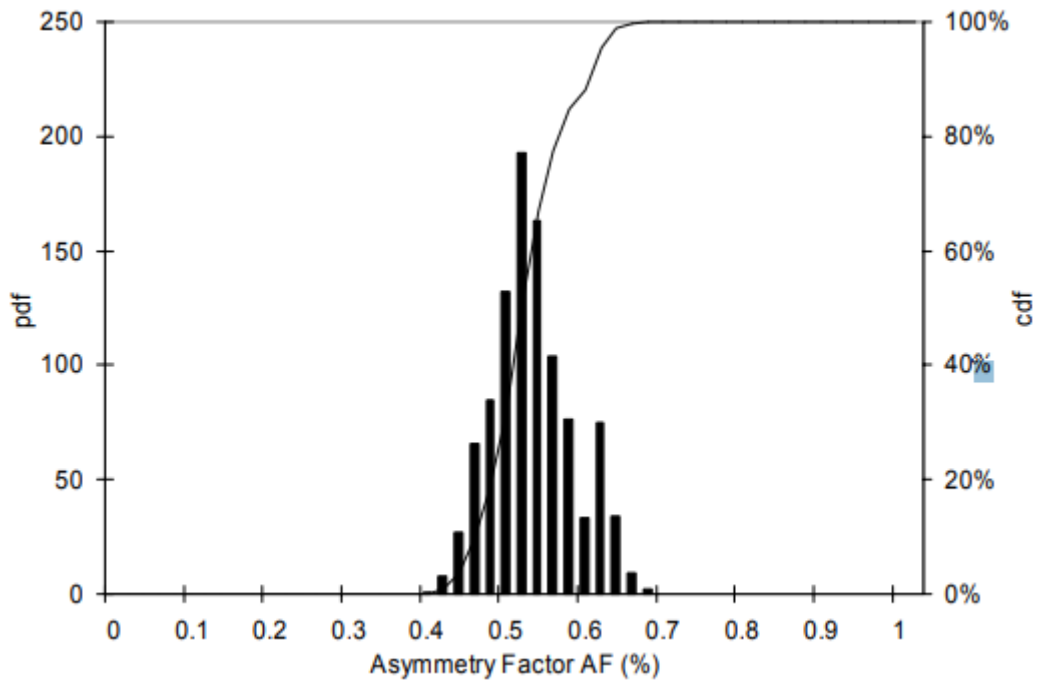


Рис. 3.8 – функції груп щільності *pdf* та *cdf* фактору асиметрії

На рисунках показано зміну середньоквадратичного рівня величини інтергармонійної групи першого порядку (частотні компоненти від 55 до 95 Гц з кроком 5 Гц) та інтергармонійної групи другого порядку (частотні компоненти від 105 до 145 Гц з кроком 5 Гц) в напрузі, виміряній за допомогою 10-хвилинного агрегування інтервалу часу і виражений у відсотках від основного компонента, а також величина короткочасного індексу вираженості мерехтіння P_{st} , одночасно вимірювана за допомогою аналізу якості енергії протягом того самого періоду моніторингу.

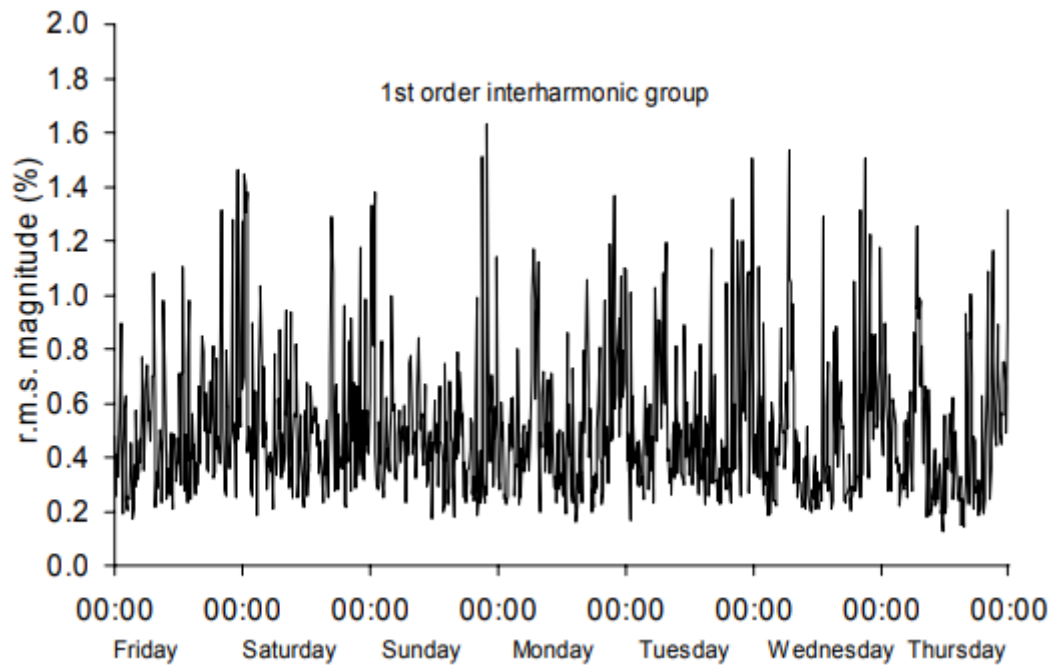


Рис. 3.9 - зміна середньоквадратичного рівня величини інтергармонійної групи першого порядку

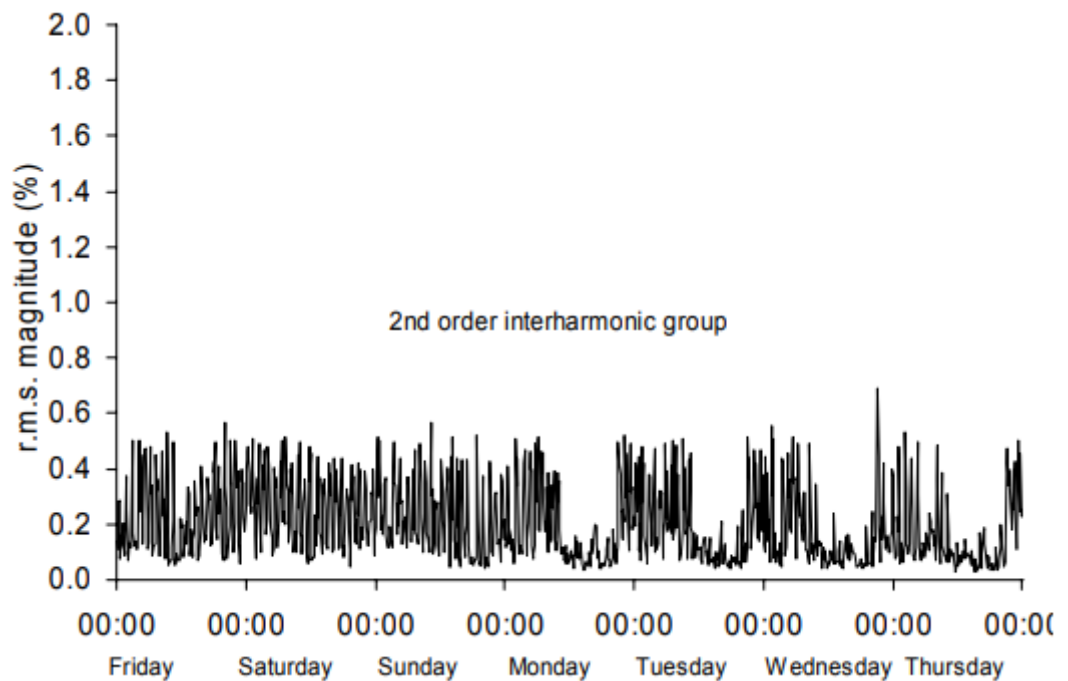


Рис. 3.10 - зміна середньоквадратичного рівня величини інтергармонійної групи другого порядку

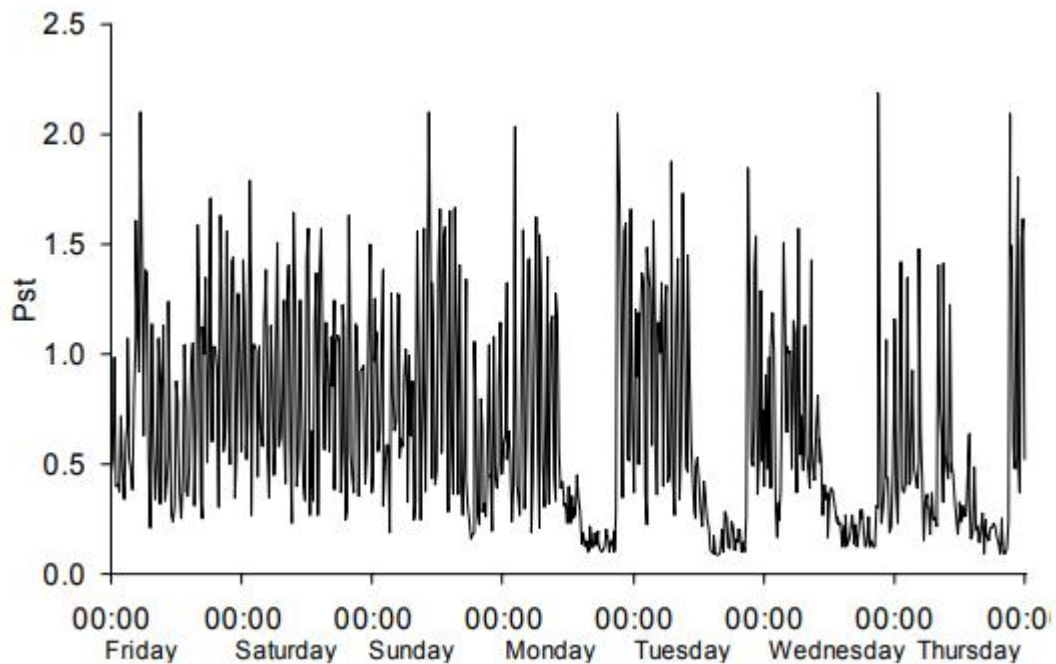


Рис. 3.11 - величина короткочасного індексу вираженості мерехтіння P_{st}

Висновки до розділу

В даному розділі представлено програмне забезпечення для розрахунку гармонійних спотворень за допомогою аналізу Фур'є та результати, отримані під час моніторингу гармонійної групи та підгрупи другого порядку в напрузі, а також асиметрія напруги форми сигналу, що виміряна в низьковольтній розподільчій мережі. Середньоквадратична величина другого порядку гармонічної групи - це максимальний діапазон 0,82% від основного компоненту, у межах прийнятого діапазону у EN50160, але вищий за очікувані значення, що показує тісну кореляцію з мерехтінням індекс тяжкості та середньоквадратичне значення величини першого порядку і міжгармонічні групи другого порядку в напрузі.

З іншого боку, величина асиметрії коефіцієнт форми сигналу напруги становить менше 0,66% від основна напруга під час моніторингу, і показує подібні моделі до THDG з піковими значеннями що відповідають піковим величинам другого порядку гармонічних груп та підгруп.

РОЗДІЛ 4 РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЄКТУ

4.1. Опис ідеї

Ідея даного стартап-проекту полягає у розробленні способу визначення та вимірювання гармонійних та інтергармонійних підгруп в електричній мережі для їх подальшого аналізу та виявлення проблемних ділянок в напрузі живлення шляхом створення відповідного програмного забезпечення.

Запровадження даного методу дозволить підвищити рівень забезпечення якості електричної енергії у зв'язку з тим, що якість безпосередньо впливає на тривалість роботи та економічність електроприладів у різних галузях виробництва.

Опис ідеї стартап-проекту, що розкриє основний зміст ідеї та можливі потенційні ринки, в межах яких потрібно проводити пошук потенційних клієнтів, вказаний в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Пропонується ідея по розробленню методу визначення та вимірювання гармонійних та інтергармонійних груп та підгруп в електричній мережі.	Визначення гармонік та інтергармонік	1. Недопущення та локалізація проблем, що виникають: низькочастотні
	Вимірювання значень гармонійних та інтергармонійних спотворень	коливання, синхронні коливання, перепади напруги, помилкове спрацювання апаратури,
	Запропонування шляхів вирішення проблем, що пов'язані з виникненням асиметричних явищ в мережі	зменшення строку служби асинхронних двигунів мерехтіння світла, перевантаження, нагрівання, насичення трансформаторів та вихід з ладу систем керування.

		<p>2. Залежно від величини збитків вирішується питання про доцільність використання додаткових пристроїв для покращення якості електроенергії на рівні споживача та постачальника.</p> <p>3. За умови, що показники якості знаходяться в допустимих межах, можна говорити про високу ефективність роботи електричного обладнання.</p>
--	--	---

Продовження таблиці 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

Визначення характеристик, аспектів, властивостей, а також сильних та слабких сторін потенційного методу є основою для оцінки його конкурентоспроможності.

Відмінністю даної ідеї проекту є застосування простих і доступних засобів, при використанні яких наявні мінімальні затрати на його здійснення та достатня ефективність для вимірювання та аналізу гармонійних спотворень та асиметрії в електричній мережі.

4.2. Технологічний аудит проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз складових, показаних в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея проекту	Технологія реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Розрахунок гармонійних спотворень при використанні програмного забезпечення за допомогою аналізу фур'є, моніторинг гармонійної групи та підгрупи в напрузі живлення та вимірювання асиметрії напруги в низьковольтній розподільчій мережі	Математичний апарат зчитування та перетворення складних сигналів, графічне відтворення методу	наявна	Дана технологія доступна для реалізації за допомогою стандартного програмного забезпечення, такого як наприклад Matlab або Python та Matplotlib

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкового середовища: складання таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають, ці фактори перераховані у таблицях 4.3 і 4.4 відповідно.

Таблиця 4.3 - Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Складне економічне становище в країні.	Брак коштів на масову реалізацію методу.	Максимальне зниження собівартості.
2.	Низький рівень зацікавленості в	За рахунок низької зацікавленості може	Популяризація напрямку

	дослідженні асиметрії та інтергармонік	спостерігатись застарілись методів вимірювань	досліджень через конференції, тощо
3.	Складна епідемічна ситуація в країні.	Зупинка роботи компаній.	Зниження попиту на даний проект

Таблиця 4.4 - Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Збільшення зацікавленості серед промисловості і вчених до проблем якості електричної енергії	Через погіршення мереж викликано асиметрією спостерігається збільшення інтересу до проблем якості електричної енергії	Використання останніх наукових публікацій задля модернізації існуючих методик
2.	Застосування цифрових фільтрів, а також аналогових аналізаторів форми сигналу	Використання інших методів вимірювання	Через використання інших технологій можливе збільшення швидкості і точності вимірювання інтергармонік

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу - матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities), SWOT-аналіз продемонстрований у таблиці 4.5.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза). Підсумовуючи сильні та слабкі сторони даного проекту слід обрати альтернативу ринкового впровадження.

Таблиця 4.5 - SWOT- аналіз стартап-проекту

S(Сильні сторони):	W(Слабкі сторони):
<ul style="list-style-type: none"> - проект не має рівносильних аналогів; - порівняно невелика вартість виконання проекту - практична значущість проекту 	<ul style="list-style-type: none"> - змінність періодичності хвилі - велика чутливість до явищ спектрального витоку - непостійність частот та амплітуд гармонік та інтергармонік
O(Можливості):	T(Загрози):
<ul style="list-style-type: none"> - через погіршення мереж, що виклакане асиметрією та інтергармоніками поступово збільшується зацікавленість серед промислових підприємств та вчених до проблеми якості електроенергії 	<ul style="list-style-type: none"> - Дуже низька зацікавленість в дослідженнях на тему асиметрії та зниження рівнів інтергармонік

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Так, як необхідно зосередитися на одному сегменті, то стратегія проекту буде концентрованою. У ролі стратегії розвитку, обрано стратегію диференціації, що передбачає надання товару важливих з точки зору

споживача відмітних властивостей, які роблять товар відмінним від товарів конкурентів. Така відмінність може базуватися на об'єктивних або суб'єктивних, відчутних і невідчутних властивостях товару, бути реальною або уявною. Інструментом реалізації стратегії диференціації є ринкове позиціонування.

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів. Вибір цільових груп потенційних споживачів проведений у таблиці 4.6

Таблиця 4.6 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільові сегменти ринку	Відмінності у можливій поведінці різних потенційних груп клієнтів	Вимоги споживачів
1	Забезпечити, щоб функціонування обладнання не було під впливом порушень напруги, що виникають з мережі	Великі промислові підприємства України	Якість напруги в мережі і в кінцевого користувача в точці підключення може бути схильна до впливу в залежності від того: як мережа керується оператором мережі, як мережа визначається	Важлива точність вимірювання окремих параметрів а також забезпечення, щоб функціонування обладнання не було під впливом

			власником мережі, а також як спроектовані і використовуються всі пристрої, підключені до мережі	порушень напруги, що виникають з мережі.
2	Відповідно до загальних умов поставки електроенергії дистриб'ютор і постачальник повинні гарантувати якість постачання, яке тягне за собою виконання стандартів і критеріїв, якість комерційних послуг; безперервність постачання електроенергії; якості напруги живлення.	Постачальник и та дистриб'ютор и електроенергії	для України як одного з найбільших постачальників електроенергії у Східній Європі проблема невідповідності ЯЕ стандартам ЄС має пріоритетне значення. Через це національна економіка через погіршення ЯЕ може зазнати чималих економічних втрат у вигляді пені енергопостачальним компаніям та у зв'язку з розірванням контрактів на	Вирішення зростаючої кількості завдань з використанням сучасних математичних методів і технічних засобів, досить актуальним завданням є пошук шляхів удосконалення (модернізації) існуючих алгоритмів (методів) визначення якісних характеристик споживання електроенергії

			постачання електроенергії до країн ЄС.	
--	--	--	--	--

Оскільки компанія зосереджується на одному сегменті – вона обирає стратегію концентрованого маркетингу. В цьому випадку компанія реалізує заходи по формуванню попиту (навчання споживачів користуванню товаром, формування регулярного попиту, збільшення споживання). Така стратегія можлива тільки на початкових стадіях життєвого циклу товару, коли попит ще є розширюваним, а взаємний тиск конкурентів ще невеликий. Інакше фірмі лідерів необхідно приймати оборонну або наступальну стратегію.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Маркетингова модель товару може бути представлена наступним чином.

Товар за задумкою: спосіб визначення та вимірювання гармонійних та інтергармонійних підгруп в електричній мережі для їх подальшого аналізу та виявлення проблемних ділянок в напрузі живлення шляхом створення відповідного програмного забезпечення.

Товар в реальному виконанні передбачає програмне забезпечення для визначення та вимірювання гармонік, інтергармонік та асиметрії в електричній мережі, створене за допомогою Python.

Визначення стратегії позиціонування показано в таблиці 4.7

Таблиця 4.7 - Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції стартап-проекту
Вимогами виступає точність і швидкість, а також доцільність і легка реалізованість запропонованих	Базовою стратегією буде виступати стратегія спеціалізації оскільки вона	Адаптивність, унікальність, інноваційність

методів вирішення	передбачає концентрацією на одному цільовому сегменті, що в даному випадку буде визначенням інтергармонік на ринку визначення показників якості електроенергії	
-------------------	---	--

Концепція, згідно з якою компанія ретельно обмірковує і координує роботу своїх численних каналів комунікації називається концепція маркетингової комунікації, вона продемонстрована у таблиці 4.8. Це робиться з метою вироблення чіткого, послідовного і переконливого уявлення у споживачів про продукт. Спрямована на інформування, переконання, нагадування споживачам та ринку в цілому про продукт і діяльність.

Таблиця 4.8 - Концепція маркетингової комунікації

Специфікація поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Клієнти шукають найбільш точні, прості і швидкі методи	Поширення за допомогою участі у форумах та	Ключовими позиціями виступають інноваційність методу вимірювання,	Донести до клієнтів, що метод буде виступати оптимальним рішенням	Спрямованість реклами від знання купівельних потреб до конкретного

	конференція х.	ефективність ззапропонован их шляхів вирішення	зادля поліпшення показників якості електроенерг ії	вирішення проблем споживача, а саме проблем якості електричної енергії
--	-------------------	---	---	--

Висновки до розділу

Наразі попит на вирішення проблем параметрів якості електричної енергії поступово зростає, оскільки, як і приватні підприємства, так і постачальники електричної енергії, збільшують зацікавленість у мінімізації втрат від неякісної електричної енергії. Тому запропонований проект буде перспективи впровадження, так як і окрім основних функцій ідентифікації завод, таких як гармонійні спотворення, інтергармоніки та асиметрія, має й

інші функції спрямовані на визначення проблемних ділянок і запропонування шлях їх вирішення. Подальша імплементація з огляду на функціонал проекту є доцільною.

ВИСНОВКИ

1. Якість електроенергії – це основоположна сукупність властивостей електроенергії, що визначають вплив на електрообладнання і регулюються за допомогою параметрів якості електричної енергії. Однак електрообладнання генерує в мережу завади, що можуть погіршувати показники якості електроенергії, одними з яких є інтергармоніки. Тому проблема недостатності дослідження для визначення наразі стає все актуальнішою.

2. Як показують дослідження, вейвлет-перетворення має низку переваг перед Фур'є-перетворенням, зокрема при ідентифікації спотворень несинусоїдальних режимів розподільних мереж 0,38/0,22 кВ. Однак основним недоліком вейвлет перетворення є його відносна складність в порівнянні з перетворенням Фур'є.

3. Окрім звичних проблем, що з'являються при виникненні гармонік, як перегрів чи зниження ресурсу, також є багато інших, таких як: значний термічний ефект, мерехтіння світла, перевантаження, телекомунікаційні та акустичні завади та збурення, насичення трансформатора, синхронні коливання, помилкові спрацювання апаратури, вихід з ладу систем керування, низькочастотні коливання та коливання напруги. Ці всі проблеми несуть значний вплив на ефективність електроспоживання.

4. Оскільки зацікавленість у вирішенні питань пов'язаних з асиметрією напруги поступово збільшується то розроблення способу її визначення з подальшою комерціалізацією задля ідентифікації асиметричних складових і зменшення негативних наслідків є доцільним

5. За результатами розробленої методики опису асиметрії напруги та гармонік, що виникають в електричній мережі, було знайдено рішення для підвищення точності проведення гармонійного аналізу.

6. Було розроблено методику визначення показника асиметрії для моніторингу наявності асиметрії в системах електропостачання.

7. Було розроблено програмне забезпечення на основі аналізу Фур'є, побудоване за допомогою Python 3 та бібліотек Matplotlib для оцінювання

гармонік, спектрального аналізу та синтезу для отримання коливань складної форми, а також фільтрації аналогових сигналів та вимірювання гармонік та інтергармонік першого та другого порядку, а також асиметрії у формі сигналу напруги.

.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загального призначеності (*EN 50160:2010, IDT*) : ДСТУ *EN 50160:2014*. – [Чинний від 2014-10-01]. – К.Мінекономрозвитку України, 2014. – 33 с. – (Національний стандарт України)
2. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97 – [Чинний від 1999-01-01]. – Технический комитет по стандартизации в области электромагнитной совместимости технических средств. – 33 с. – (Межгосударственный стандарт)
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий : [4-е издание переработанное и дополненное] / И.В. Жежеленко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с
4. Иванов В.С. Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с. – (Экономия топлива и электроэнергии).
5. . Мельник Л.Г. Економіка енергетики : [підручник] / Л.Г. Мельник, І.М. Сотник. – Суми: Університетська книга, 2015. – 378 с.
6. Сапунов М. В. Вопросы качества электроэнергии / М. В. Сапунов // Новости электротехники. — 2001. — № 4.
7. *EN 61000-4-30:2009* Електромагнітна сумісність (*EMC*). Частина 4-30. Методики випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії
8. ДСТУ *IEC 61000-4-30:2010* Електромагнітна сумісність. Частина 4-30. Методи випробування та вимірювання. Вимірювання показників якості електричної енергії (*IEC 61000-4-30:2008, IDT*)
9. *Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. Analysis of permissible level of voltage asymmetry and harmonics in electrical networks // Proceeding ICHPS IV.*

Intern. Conf. on harmonics in power systems. October 4-6, 1990, Budapest, Hungary. iQ. 18i24.

10. *Kuznetsov V.G., Shpolianskii O.G. Variation analysis of asynchronous motor electrical power consumption and losses under non sinusoidal voltage // Elektriika. i 2006. №4. - P. 25-29*

11. *Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G. Improving of power quality in electrical networks. – Kiev: Naukova dumka, 1985. i 268 p.*

12. *Shidlovskii A.K., Kuznetsov V.G., Nikolaenko V.G. Economic evaluation of results of power quality degradation in the modern electrical supply systems / Preprint - 253, Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine. – Kiev, 1981. - 49 p. (Rus)*

13. Сапунов М. В. Вопросы качества электроэнергии / М. В. Сапунов // Новости электротехники. — 2001. — № 5.

14. Шидловский А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – Киев: Наукова думка, 2005. – 211 с.

15. Пивняк Г.Г. Интергармоніки в системах електропостачання / Г.Г. Пивняк, І.В. Жежеленко, Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко // Науковий вісник НГУ. – 2017. – №6. – С.109-114.

16. *Shah N. Harmonics in power systems Causes, effects and control // Whitepaper [Электронный ресурс]. – USA: Siemens Industry, Inc. – 2013.*

17. Особливі режими електричних мереж: Навчальний посібник/ Г.Г. Пивняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська. - Д.: Національний гірничий університет, 2009.-376 с.

18. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил [и др.]. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.

19. Н. М. Астафьева, “Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения”, УФН, 166:11 (1996), 1145–1170; Phys. Usp., 39:11 (1996), 1085–1108

20. Шидловский А.К., Кузнецов В.Г. Повышение качества энергии в электрических сетях – Киев: Наук. думка, 1985. – 268с.
21. Шидловский А.К., Жаркин А.Ф. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях – Киев: Наук. Думка, 2005. – 210с.
22. *Asheesh Kumar Singh, G.K. Singh, R. Mitra “Impact of Source Voltage Unbalance on AC- DC Rectifier Performance” 2nd International Conference on Power Electronics System and Applications – 2006.*
23. *Annette von Jouanne, Senior Member, IEEE and Basudeb (Ben) Banerjee, Member, IEEE “Assessment of Voltage Unbalance” IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 16, NO. 4, OCTOBER 2001*
24. *J.A. Orr, A.E. Emanuel, “On the need for strict second harmonic limits”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 15, No. 3, July 2000, pp. 967-971.*
25. *G.T. Heydt, Y. Liu, “Second harmonic components in power system voltages and currents”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2006, pp. 521-523.*
26. *IEC Standard 61000-4-7. Electromagnetic compatibility (EMC), Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto. Second edition, 2002.*
27. *J. Barros, E. Pérez A. Pigazo, R.I. Diego, “Simultaneous measurement of harmonics, interharmonics and flicker in a power system for power quality analysis”, Fifth International Conference on Power System Management and Control (IEE Conf. Publ. No.488). IEE, London, UK, April 2002, pp. 100-105.*
28. Розанов Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Розанов Ю.К., Рябчинський М.В., Кваснюк А.А. - М.: Издательский дом МЭИ, 2007. - 632 с.
29. Церазов А.Л. Исследование влияний несимметрии и несинусоидальности напряжения на работу асинхронных двигателей / А.Л. Церазов, Н.И. Якименко. - М.: Госэнергоиздат, 1963. - 120с.

30. Залмазон Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. — М. : Наука. Гл. ред. физ.- мат. лит., 1989. — 496 с.
31. Март С. Ё. Цифровой спектральный анализ и его приложения. — М. : Мир, 1990. — 584 с.
32. Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов: Пер. с англ. — М. : Мир, 1989. — 448 с.
33. *Andria G., Savino H., Trotta A. Windows and Interpolation Algorithms to Improve Electrical Measurement Accuracy // Transactions on Instrumentation and Measurement. — 1989. — Vol. 38, № 4. — P. 856—863.*
34. *Girgis A., Chang B., Makram E. A Digital Recursive Measurement for on Line Tracking of Power Systems Harmonics // IEEE Trans. On Power Delivery. — 1991. — Vol. 6, № 3. — P. 1153—1160.*
35. *Dash P., Pradham A., Panda G. Frequency Estimation of Distorted Power System Signals Using Extended Complex Kalman Filters // IEEE Trans. On Power Delivery. — 1999. — Vol. 14, № 3. — P. 761—766.*
36. *Hart D., Uy D., Novosel D. et al Improving Power Quality // ABB Review. — 2000. — Vol. 4, № 1. — P. 12—19.*