

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

Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту
(повна назва інституту)

Кафедра електропостачання _____
(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри
_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО
«__» _____ 20__ р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
спеціалізації Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології

на тему: «Інтергармоніки та їх вплив на точність визначення коефіцієнту
спотворення форми електричної напруги»

Виконав (-ла): студент (-ка) II курсу, групи ОН-01мп

Савіцький Дмитро Олександрович
(прізвище, ім'я по батькові)

(підпис)

Науковий керівник д.т.н., проф. Волошко А.В.
(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 (-ка) _____

Київ – 2021 року

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

Інститут/факультет Навчально-науковий інститут енергозбереження та енергоменеджменту

Кафедра електропостачання

(повна назва)

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

Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Спеціалізація «Енергетичний менеджмент та енергоефективні технології»

В.о. завідувача кафедри

_____ Денис ДЕРЕВ'ЯНКО

«__» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію студенту

Савіцький Дмитро Олександрович

1. Тема дисертації «Інтергармоніки та їх вплив на точність визначення коефіцієнту спотворення форми електричної напруги»

науковий керівник дисертації д.т.н., проф. Волошко Анатолій Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «__» листопада 2021 р. №__

2. Строк подання студентом дисертації 13 грудня 2021 року

3. Об'єкт дослідження процес оцінювання впливу інтергармоніки на точність визначення коефіцієнту спотворення форми електричної напруги

4. Предмет дослідження методи та засоби визначення інтергармонік та їх вплив на точність визначення коефіцієнту спотворення форми електричної напруги

5. Перелік завдань, які потрібно розробити

а) пошук теоретичного підґрунтя для визначення впливу інтергармонік на точність визначення коефіцієнту спотворення форми електричної напруги

б) проаналізувати сучасний стан, методи та проблеми визначення інтергармонік у електричній мережі

в) аналіз впливу інтергармонік на точність визначення коефіцієнту спотворення форм електричної напруги

г) розробити спосіб визначення інтергармонік на основі вейвлет-аналізу

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: блок-схеми, графічні матеріали, діаграми, амплітудні характеристики, презентаційний матеріал

7. Орієнтовний перелік публікацій

а) Волошко А.В., Савіцький Д.О. Дослідження інтергармоніки на основі застосування пакетного вейвлет-перетворення / IV науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ (Київ 17-18 листопада 2021 р.)

8. Консультанти розділів дисертації

Нормоконтроль

ас. Прокопенко І.Д.

9. Дата видачі завдання 01 вересня 2021 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів МД	Примітка
1	Отримання завдання	29.05.2021	
2	Аналіз літературних джерел	1.05.21-29.08.21	
3	Робота над першим розділом	1.09.21-14.09.21	
4	Робота над другим розділом	15.09.21-30.09.21	
5	Робота над третім розділом	1.10.21-13.10.21	
6	Розробка стартап проекту	14.10.21-29.10.21	
7	Оформлення дисертації	30.10.21-3.11.21	
8	Оформлення реферату та презентації, проходження перевірки на плагіат та рецензування	30. 10.21-10.12.21	
9	Передзахист МД	10.12.21-14.12.21	
10	Захист дисертації	20.12.21-22.12.21	

Студент

(підпис)

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації

(підпис)

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Структура та обсяг роботи: дисертація складається з переліку умовних скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який містить 46 найменувань, з них 34 іноземних. Загальний обсяг роботи складає 95 сторінок, містить 39 рисунків, 17 таблиць. Для виконання роботи використовувалось програмне забезпечення: MS Office.

Актуальність теми. Пов'язана з погіршенням стану якості електроенергії та електричних мереж викликаних спотворенням форм електричної напруги на які впливають інтергармоніки, через це спостерігається збільшення інтересу серед промисловості і вчених до проблем якості електричної енергії для її покращення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Представлена робота є однією з головних тематик Навчально-наукового Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ імені Ігоря Сікорського» щодо інформаційного забезпечення задач вимірювання, аналізу, планування, дослідження якості електроенергії.

Мета й завдання дослідження. Метою дослідження в даній дисертації є знаходження способу визначення інтергармонік та їх вплив на спотворення форми електричної напруги.

Сформована мета вимагає наступні завдання дослідження:

- Оцінити інтергармоніки та сучасні методи їх дослідження.
- Проаналізувати сучасний стан методів і засобів визначення коефіцієнту спотворень форм електричної напруги.
- Визначити вплив інтергармоніки на точність визначення коефіцієнту спотворення форми електричної напруги.

Об'єкт дослідження. Процес визначення впливу інтергармонік на коефіцієнт спотворення форм електроенергії в Україні.

Предмет дослідження. Методи та засоби визначення інтергармонік та їх вплив на точність визначення коефіцієнту спотворення форми електричної напруги.

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

Наукова новизна одержаних результатів.

- Проведено порівняльну характеристику методів дослідження інтергармонік та їх вплив на визначення коефіцієнту спотворення форми електричної напруги.
- Розроблено модель ідентифікації наявності спотворень якості електричної енергії.
- Розроблено спосіб визначення впливу інтергармоніки на коефіцієнта спотворення форми електричної напруги та методи його усунення.

Практичне значення одержаних результатів. Одержані в роботі результати мають практичне значення при дослідження інтергармонік та їх впливу на коефіцієнт спотворення форми електричної напруги, що є необхідною складовою стабільної роботи енергетичної системи в цілому.

Апробація.

- 1) IV Науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ (Київ, 17 - 18 листопада 2021 рік).

Публікації.

- 1) Волошко А.В., Савіцький Д.О. Дослідження інтергармоніки на основі застосування пакетного вейвлет-перетворення / IV науково-технічна конференція магістрантів ІЕЕ (за результатами дисертаційних досліджень магістрантів) (Київ 17-18 листопада 2021 р.)

Ключові слова. Інтергармоніки, гармоніки, коефіцієнт спотворення напруги, вейвлет-перетворення, Вейвлет-аналіз, Вейвлет-перетворення, швидке перетворення Фур'є.

ABSTRACT

Structure and scope of work: the dissertation consists of a list of abbreviations, introduction, four chapters, conclusions, a list of sources used, which contains 46 titles, including 34 foreign. The total volume of the work is 95 pages, contains 39 figures, 17 tables. To perform the work used software: MS Office.

Actuality of theme. It is associated with the deterioration of the quality of electricity and electricity networks caused by distortion of voltage forms affected by interharmonics, due to which there is an increasing interest among industry and scientists in the problems of electricity quality to improve it.

Connection of work with scientific programs, plans, themes. The presented work is one of the main topics of the Educational and Scientific Institute of Energy Conservation and Energy Management of NTUU "Igor Sikorsky KPI" on information support of measurement, analysis, planning and research of electricity quality.

The purpose and objectives of the study. The aim of the research in this dissertation is to find a way to determine the interharmonics and their effect on the distortion of the shape of the voltage.

The formed goal requires the following research objectives.

- Evaluate interharmonics and modern methods of their research.
- To analyze the current state of methods and means of determining the coefficient of distortion of forms of electric voltage.
- To determine the influence of interharmonics on the accuracy of determining the distortion factor of the shape of the electric voltage.

Object of study. The process of determining the influence of interharmonics on the coefficient of distortion of forms of electricity in Ukraine.

Subject of study. Methods and means of determining interharmonics and their influence on the accuracy of determining the distortion coefficient of the shape of electric voltage.

Research methods. The methodological basis of the dissertation research is a set of general scientific and special methods, namely the methods of Wavelet analysis and Fourier analysis methods.

Scientific novelty of the obtained results.

- The comparative characteristic of methods of research of interharmonics and their influence on definition of coefficient of distortion of a form of electric voltage is carried out.

- A model for identifying the presence of distortions in the quality of electricity has been developed.

- A method for determining the influence of interharmonics on the distortion coefficient of the shape of electric voltage and methods for its elimination have been developed.

The practical significance of the results obtained. The results obtained in this work are of practical importance in the study of interharmonics and their influence on the distortion coefficient of the shape of the electric voltage, which is a necessary component of stable operation of the energy system as a whole.

Approbation.

- 1) IV Scientific and Technical Conference of IEE Masters (Kyiv, November 17-18, 2021).

Publications.

- 1) Voloshko AV, Savitsky DO Research of interharmonics on the basis of application of batch wavelet transformation / IV scientific and technical conference of masters of IEE (according to results of dissertation researches of masters) (Kiev November 17-18, 2021)

Keywords. Interharmonics, harmonics, voltage distortion coefficient, wavelet transform, Wavelet analysis, Wavelet transform, fast Fourier transform.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень.....	10
Вступ.....	11
Розділ 1 - Відомості про інтергармоніки та їх вплив на коефіцієнт спотворення.....	12
1.1 Інтергармоніки. Основні поняття.....	12
1.1.1 Походження інтергармонік.....	13
1.1.2 Інтергармонічні джерела.....	16
1.1.3 Інтергармонічні ефекти.....	20
1.1.4 Вимірювання інтергармонік.....	22
1.1.5 Інтергармонічні стандарти, рекомендації та обмеження.....	25
1.1.6 Інтергармонічне пом'якшення.....	27
1.1.7 Вплив інтергармонік.....	29
1.2 Сучасні методи дослідження і визначення інтергармонік.....	32
1.2.1 Визначення інтергармонік з графіка стохастичних процесів.....	34
1.2.2 Визначення інтергармонік параметричним методом.....	35
1.2.3 Визначення інтергармонік рекурсивним методом.....	36
1.2.4 Дискретне перетворення Фур'є.....	37
1.2.5 Інтергармоніки і флікер.....	41
1.2.6 Міжнародні стандарти вимірювання інтергармонік.....	46
1.2.7 Проблеми при визначенні інтергармонік.....	47
1.3 Пошук та вплив коефіцієнту спотворення згідно ІЕС 61000-4-7.....	48
Висновки до розділу.....	49
Розділ 2 - Вплив методології вимірювань інтергармонік на точність аналізу спотворення форми електричної напруги.....	50
2.1 Стандартизація вимірювання.....	50
2.2. Оцінка спотворення форми сигналу.....	54
2.3 Фактори спотворення сигналів.....	55
2.4 Випробувальна станція.....	57
2.5 Результати.....	58

Висновки до розділу.....	63
Розділ 3 - Розробка та впровадження способу визначення коефіцієнту спотворень форми електричної напруги.....	64
3.1 Основи вейвлет-аналізу.....	64
3.2 Розробка способу виявлення та ідентифікації коефіцієнту спотворень якості електроенергії (форми напруги).....	66
Висновки до розділу.....	78
Розділ 4 - Розроблення стартап-проекту.....	79
4.1 Опис ідеї методу.....	79
4.1.1 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	79
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	80
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	80
4.3.1 Аналіз попиту, наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку.....	80
4.3.2 Визначення потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтованих переліків і вимог до товару для кожної групи.....	82
4.3.3 Аналіз ринкового середовища: складання таблиці факторів, ринкове впровадження проекту та фактори що цьому перешкоджають.....	82
4.3.4 Аналіз пропозиції: загальні риси конкуренції на ринку.....	83
4.3.5 Детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю сил М. Портера)...	84
4.3.6 SWOT-аналіз стартап-проекту.....	85
4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту.....	86
4.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку.....	86
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	87
4.5.1 Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач.....	87
4.5.2 Розроблення трьох рівневої маркетингової моделі товару.....	87
4.5.3 Розроблення концепції маркетингових комунікацій.....	88
Висновки до розділу.....	88
Висновки.....	89
Перелік використаних джерел.....	91

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АЧХ - амплітудно частотна характеристика

АЛЕ - адаптивний лінійний елемент

БВП - безперервне вейвлет-перетворення

БТІЗ - біполярні транзистори з ізольованим затвором

ВПП - величини підгрупи гармонік

ВІП - величини інтергармонійної підгрупи

ДПФ - дискретне перетворення Фур'є

КПФ - короткочасне перетворення Фур'є

КСН - критерії стійкості Найквіста

ПГС - повне гармонійне спотворення

ПДН - перетворювачі джерела напруги

ПДС - перетворювачі джерела струму

ПФЦ – покращення фазового циклу

ПЯЕ - показники якості електроенергії

СКЗ - середньоквадратичне значення

ШІМ - широтно-імпульсна модуляція

ШПФ - швидких перетворень Фур'є

ІЕС - Міжнародна (International) електротехнічна (Electrotechnical) комісія (Commission)

ІЕЕЕ – Інститут (Institute) інженерів (Engineers) електротехніки (Electronics) та (and) електроніки (Electrical)

ESPRIT - Оцінка (Estimation) параметрів сигналу за (of Signal Parameters) допомогою ротаційної (via Rotational) інваріантної (Invariant) техніки (Techniques)

RMS - середньоквадратичне (значення)

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

ВСТУП

Від початку своєї появи електрична енергія використовується у всіх сферах життєдіяльності людини. Електрична енергія має комплекс специфічних властивостей, які приймають участь у створенні інших видів продукції, впливаючи на їх якість. Тому через наявність інтергармонік мереж.

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 спектрального витоку.

Кількість електронних пристроїв, якими користуються побутові, комерційні та промислові споживачі, постійно збільшується. Ці пристрої є нелінійними навантаженнями, які вводять гармонічні та інтергармонічні струми в низьковольтні мережі, що може призвести до підвищення рівнів спотворення напруги додаткового навантаження нульового провідника, перегріву або пошкодження конденсаторів для компенсації реактивної потужності та несправності обладнання.

Більшість досліджень, що аналізують вплив технологій на якість електроенергії засновані на моделюванні яке використовує ідеальне джерело струму для представлення цих навантажень. Параметри джерела струму (величина і кут гармонік струму) зазвичай отримують з вимірювань відповідних приладів на основі специфікацій міжнародних стандартів, наприклад ІЕС 61000-3-2. Ці стандарти визначають майже неспотворену напругу для вимірювання гармонік струму не говорячи вже про інтергармоніки. Тому на меті було поставлено завдання розібратися в даному питанні.

РОЗДІЛ 1 - ВІДОМОСТІ ПРО ІНТЕРГАРМОНІКИ ТА ЇХ ВПЛИВ НА КОЕФІЦІЄНТ СПОТВОРЕННЯ

1.1 Інтергармоніки. Основні поняття

Інтергармоніки є струми або напруги, які не є кратними основній частоті змінного струму. Повного розуміння природи електромагнітних збурень, що асоціюються з інтергармоніками, ще немає і в даний час до цього явища виник підвищений інтерес. Інтергармонік завжди присутні в системі електропостачання але останнім часом з різким збільшенням силових електронних систем їх практичний вплив стало більш відчутним.

Стандарт ІЕС 61000-2-1 визначає інтергармоніки наступним чином:

В гармоніках напруги та струму, частоти живлення можна спостерігати подальші частоти які не є цілими частотами фундаментальних. Вони можуть з'являтися як дискретні частоти або як широкосмуговий спектр. Найпоширенішим індексом для оцінки впливу гармонік є ПГС - це показник ефективного значення гармонічних компонентів спотвореної форми сигналу. Це потенційна теплова вартість інтергармонік відносно фундаментальної. Цей індекс можна використовувати як для напруги так і для струму.

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.

Інтергармоніки можуть також бути викликані коливаннями, що виникають наприклад в системах, що складаються з серії або паралельних конденсаторів або коли трансформатори піддаються насиченню та під час процесів комутації.

Інтергармонійна цільова група - активна дослідницька організація по інтергармонікам. Серія їхніх робочих документів були опубліковані і рекомендовані

для включення інтергармонік до стандарту IEEE-519. В основному вони приймають стандарт ІЕС для визначення, виміру і обмеження інтергармонік.

У ІЕС 61000-4-7 дозволили стандартизувати 5Гц для виміру інтергармонік та інтергармонічних груп. Групи або підгрупи гармонік і інтергармонік визначаються для звіту про виміри. Підгрупу рекомендується використовувати, якщо мова йде про інтергармоніки. Гармонійна підгрупа включає в себе один елемент дозволу по гармоніці і два елемента, що примикають до центральної гармоніки наприклад (175, 180, 185Гц) - це 3-тя гармонійна група. Всі інші інтервали між двома сусідніми гармонійними підгрупами утворюють інтергармонічну групу. Наприклад, (130, 135, ..., 165, 170Гц) - інтергармонічна підгрупа між 2 і 3-ої гармоніками. Це поняття, очевидно, має намір розкрити проблема витоку. Треба брати до уваги деякі обмеження цього стандарту. По-перше, інтегрармонічні частоти не можуть бути точно знайденими в рамках цієї структури. У цьому стандарті центральна частота інтергармонічної групи визначається як групова частота, немає точної інтергармонічної інформації про частоту доступну для її вимірювання.

Визначена частота групи може бути далекою від фактичної складової, коли розташована інтергармоніка близька до фундаментальної або певної гармоніки. По-друге і що ще важливіше, ті інтергармоніки які близькі до них фундаментальні чи гармонічні не вдалося виявити належним чином. Ці інтергармоніки, близькі до гармонічних або фундаментальних викликають значне мерехтіння. Тому дуже бажано виявлення цих проміжних гармонік для усунення проблем з мерехтінням. Але оскільки стандарт включає елементи дискретизації, суміжні з гармонікою, в підгрупу гармонік, можливість виявлення флікера, що викликає інтергармонік буде значно зменшена.

1.1.1 Походження інтергармонік

Інтергармонійну генерацію в основному можна розділити на два механізми, де перший є генерацією частотних складових поблизу гармонік (включаючи основні). Вони здебільшого викликані амплітудними модуляціями напруг і струмів, але також можуть бути результатом перехідної роботи навантажень. Другий - це генерація

частотних компонентів розташованих у будь-якій точці спектру. Вони викликані операціями перемикання, де перемикання є асинхронним з частотою живлення. Обладнання в якому обидва ці механізми діють одночасно не є рідкістю.

Джерелами інтергармонік є наприклад дугові навантаження, такі як дугові печі або зварювальні апарати, електродвигуни, статичні частотні перетворювачі і сигнальна напруга в енергетичних системах.

Статичний перетворювач частоти призначений для перетворення змінної напруги живлення в змінну напругу іншої частоти. У непрямих перетворювачах частоти це здійснюється за допомогою перетворення ЗС-ПС-ЗС, де перетворення ЗС-ПС виконується випрямлячем, а перетворення ПС-ЗС здійснюється інвертором. В ідеалі зв'язок постійного струму повинен містити фільтр, який роз'єднує струм або напругу живлення та навантаження. Однак насправді ідеальна фільтрація неможлива, і буде певний рівень зв'язку, що означає, що компоненти струму, пов'язані з навантаженням, можуть поширюватися через зв'язок постійного струму в систему живлення, і навпаки. Непрямі перетворювачі частоти можна розділити на ПДС і ПДН.

Для ПДС де приклад одного показано на (рис. 1), є два трифазних мости де один працює як випрямляч а другий як інвертор. Між двома мостами знаходиться зв'язок постійного струму з індуктивністю. Загальна формула для частот струму живлення наведена в (форм. 1):

$$\text{Частоти в струмі живлення} = (kp_1 \pm 1) * f_1 \pm (np_2 f_2), (1)$$

де f_1 і f_2 є основними частотами постачання і навантаження, відповідно, і p_1 і p_2 є відповідними імпульсними числами двох трифазних мостів (p_1 і p_2 дорівнюють шести в рис. 1), і де $k = 0, 1, 2, \dots$ і $n = 0, 1, 2, \dots$. Як приклад, $k = 1$ і $n = 1, 2, 3, \dots$ дасть інтергармоніки в бічних смугах 5 і 7 гармоніки частоти живлення. Якщо n встановлено на нуль, а $k = 0, 1, 2, \dots$ вихід (форм. 1) буде характерними гармоніками (включаючи основні) перетворювача на стороні живлення. Це відповідає частотним спектрам зображені на (рис.1-2).

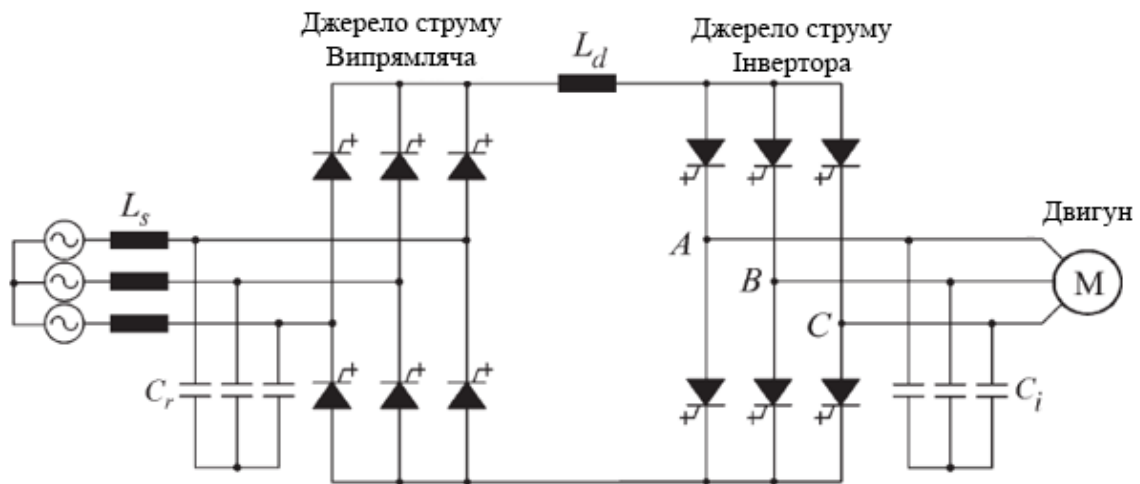


Рисунок 1 - Перетворювач з поточним джерелом (ПДС), що живить двигун

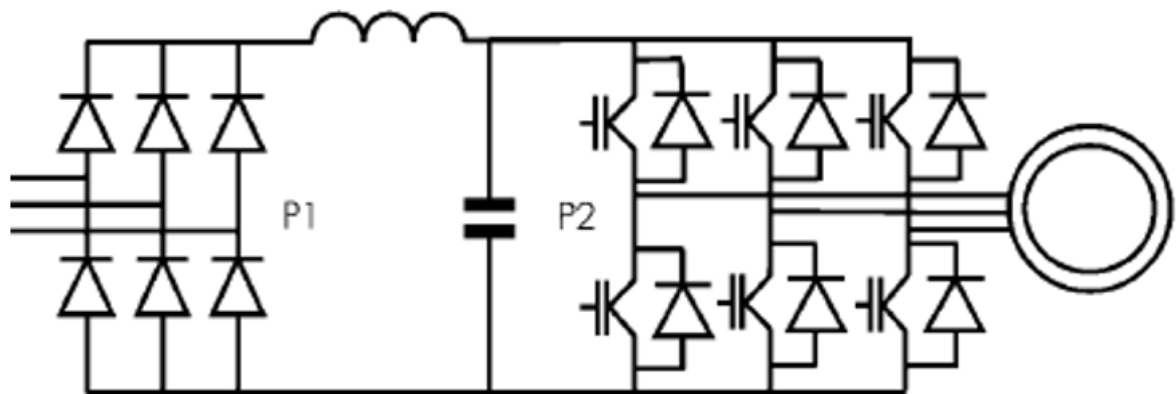


Рисунок 2 - Перетворювач джерела напруги (ПДН)

Особливим випадком статичних частотних перетворювачів є циклоконвертор, який перетворює змінний струм однієї частоти в змінний струм меншої частоти ніж подача. Циклоконвертори на відміну від непрямих частотних перетворювачів, не мають постійного зв'язку. Один однофазний до іншого однофазного циклоконвертора можна побачити на (рис. 3). Струми введені в подачу циклоконверторами, також є частотами відповідно до (форм. 1), але нехарактерні частоти відповідно до (форм. 2) також можуть виникати, якщо між фазними напругами і кутом подачі може виникнути дисбаланс навантаження або асиметрія. З різних видів статичних перетворювачів частоти циклоконвертора, як правило є тим, що має найбільш

серйозні інтергармонічні викиди. Це пов'язано з відсутністю декупаційної ЗС-ланки, що означає, що випрямляч безпосередньо підключений до інвертора.

$$\text{Частоти в струмі живлення} = (k_{p1} \pm 1) * f_1 \pm (2 * n f_2), (2)$$

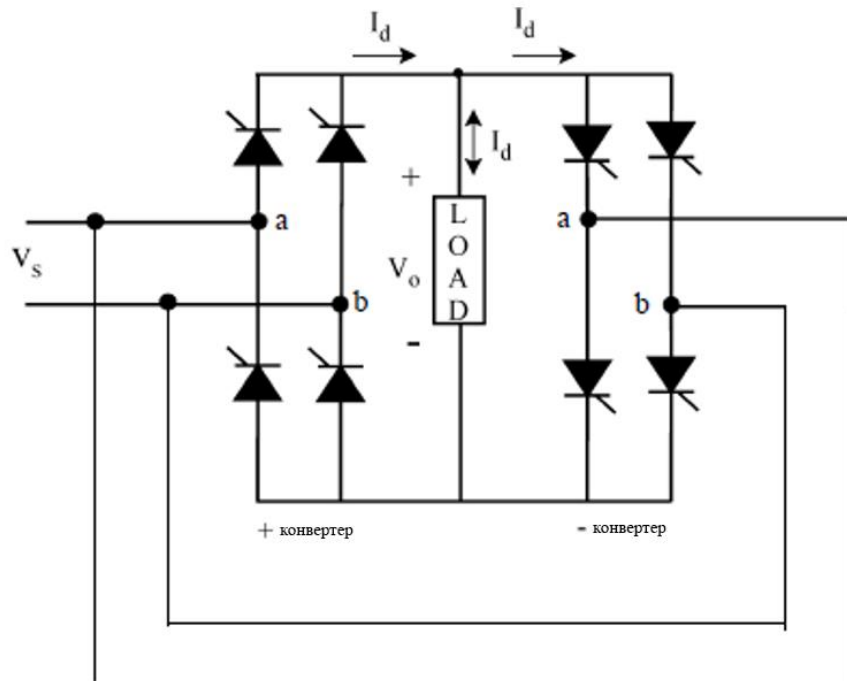


Рисунок 3 - Однофазний до однофазного циклоконвертора

Дугова піч є прикладом періодично різного навантаження, яке відноситься до списку інтергармонічних джерел. Струм намальований періодично різним навантаженням можна описати за (форм. 3):

$$I(t) = \frac{V(t)}{R(t)} = \frac{\sin(2\pi f_s \cdot t)}{1 - r \cdot \sin(2\pi f_L \cdot t)}, (3)$$

де f_s - частота системи постачання, f_L - частота різного навантаження, а $r < 1$. Значення r залежить від характеристик опору навантаження, також (форм. 4) показує як змінюється опір навантаження. Можна показати, що частотні компоненти в струмі будуть у формі:

$$f_s \pm 1f_L, f_s \pm 2f_L, f_s \pm 3f_L, \dots, (4)$$

1.1.2 Інтергармонічні джерела

Інтергармоніки силових систем найчастіше створюються двома загальними явищами. Перший - це швидкі неперіодичні зміни струму та напруги, викликані

навантаженнями, що працюють у перехідному стані (тимчасово чи постійно) або коли для цілей керування реалізована модуляція напруги чи струму амплітуди. Ці зміни можуть бути досить випадковими або, залежно від процесу та використовуваних засобів контролю, досить послідовними. Зміни величини струму або фазового кута можуть також створювати складові бічної панелі основної частоти та її гармонік на інтергармонійних частотах.

Другим джерелом інтергармонік є перемикання статичного перетворювача не синхронізованого з частотою енергосистеми (асинхронне перемикання). Перетворювачі з тиристорним перемиканням переходять у режим прямого проведення і продовжують провідність до тих пір поки їх струм не впаде нижче свого струму утримання. Вимикаючи при однаковій напрузі кожен цикл тиристорні пристрої синхронізуються з частотою енергосистеми і не виробляють інтергармонік. (БТІЗ), які можна вимкнути, а також увімкнути в будь-який час замінюють тиристори в перетворювачах оскільки їх більша гнучкість дозволяє як реактивне так і реальне регулювання потужності та гасіння коливань енергосистеми. Асинхронне перемикання перетворювачів з використанням БТІЗ створює інтергармоніки.

Коливання між послідовними або паралельними конденсаторами або коли трансформатори або асинхронні двигуни насичуються, також можуть викликати інтергармоніки. Деякі конкретні джерела інтергармонік включають дугові навантаження, асинхронні двигуни (за деяких умов), електронні перетворювачі частоти приводи змінного навантаження перетворювачі джерел напруги та засоби зв'язку на лінії електропередачі.

Дугові навантаження включають дугові печі та зварювальні апарати. Для більшості великих промислових дугових печей перехідне навантаження та інтергармоніки змінюються протягом циклу розплаву. Змінність навантаження і результуюча інтергармоніка зазвичай більша на початку циклу розплаву. Зварювальні апарати виробляють більш безперервний частотний спектр, який включає багато інтергармонічних частот.

Асинхронні двигуни мають прорізи в залізі статора і ротора, які можуть виробляти інтергармоніки коли їх магнітні ланцюги насичуються. Ці інтергармоніки можуть збільшуватися під час запуску. Моторна асиметрія також може викликати інтергармоніки. Змінне навантаження крутного моменту також може призвести до того, що двигуни виробляють інтергармоніки.

Електронні перетворювачі частоти використовують ланку постійного струму для перетворення однієї частоти в іншу. Фільтрація на шині постійного струму використовується для роз'єднання напруги та струму на кожній стороні лінії зв'язку але ця фільтрація ніколи не є ідеальною і між двома системами змінного струму можуть передаватися інтергармонійні спотворення.

Занурення зі змінним навантаженням такі як джерела живлення тягової системи, які використовують БТІЗ або відчувають раптові зміни навантаження можуть створювати інтергармоніки, як правило на фіксованих частотах.

ПДН використовуються для різноманітних застосувань включаючи перетворення сучасних вітрогенераторів постійного струму в змінні, статичних компенсаторів, статичних синхронних генераторів і в системах передавання електричної енергії. Використання БТІЗ в ПДН має переваги перед лінійними комутованими перетворювачами, які використовують тиристори. Серед цих переваг можливість незалежно регулювати реактивну потужність на кожному перетворювачі працювати в дуже слабких системних умовах і запускати один термінал постійного струму від іншого. Здатність БТІЗ вимикатися в будь який момент також дозволяє майже миттєво керувати, що можна використовувати для підвищення стабільності системи шляхом гасіння коливань.

Одним із наслідків посилення контролю, що забезпечується ПДН, є вироблення інтергармонік. Рівень інтергармонік, що створюється пристроєм ПДН, залежить від його типу. Більш ранні типи використовували ШІМ, яка створювала набагато вищі інтергармоніки, ніж новіші модульні багаторівневі конструкції. Інші типи такі як каскадні дворівневі також створюють інтергармоніки. Приклади напруг, створених ШІМ та ПДН, показані на (рис. 4). Крім типу частота та рівень інтергармонік

створюваних конкретним перетворювачем ПДН, залежить від ряду проектних факторів (число імпульсів, рівні тощо), які обраний з причин зазвичай не пов'язаних з інтергармонійною генерацією.

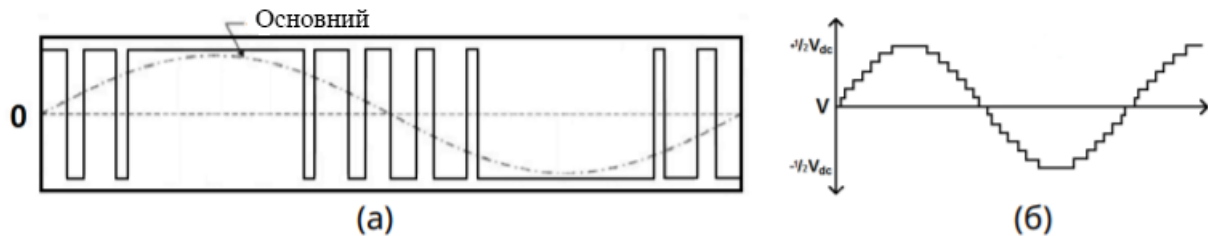


Рисунок 4 - а) Широтно-імпульсна модуляція і б) Модульний багаторівневий

Лінія зв'язку використовуються деякими комунальними службами для передачі інформації про захист системи керування певними навантаженнями або реактивними ресурсами або забезпечення двостороннього зв'язку з «розумними» лічильниками споживачів. Усі ці системи використовують неперіодичні сигнали додані до сигналу частоти потужності для зв'язку. Інформація про захист зазвичай передається з використанням частот в діапазоні 100Гц і призначена для передачі з одного місця в інше та запобігання доступу до ширшої системи за допомогою хвильових пасток. Сигнали керування навантаженням або реактивними ресурсами в діапазоні від 100 до 3000Гц, які іноді називають сигналами керування пульсацією досягають ширшої системи але як правило мають низьку величину, коротку тривалість і використовуються нечасто. Як сигнали захисту так і сигнали керування навантаженням зазвичай використовують мінімальну кількість частот, які призначені для передачі простих інструкцій (відключення, блокування, увімкнути або вимкнути). Сигнали вищої частоти, до 100кГц, можуть використовуватися на менших ділянках для комерційних комунікацій.

Зв'язок розумних лічильників по лініях електропередачі використовувався для різних цілей з різним рівнем інтенсивності даних. Як правило, струм, напруга або обидва коротко замикаються на землю, щоб надіслати кроковий сигнал, який інтерпретується як двійковий біт. Серії бітів інтерпретуються для ідентифікації

лічильника та інформації, яку він надсилає. Декілька лічильників можуть надсилати сигнали одночасно але з численними спробами зв'язку та перевіркою помилок зв'язок може бути досить надійним. Ці сигнали включають широкий діапазон інтергармонічних частот але їх величина як правило зменшується зі збільшенням частоти.

Інтергармоніки можна генерувати і переносити на будь-який рівень напруги. Хоча відносно обмежена кількість інтергармонічних вимірювань є загальнодоступними низькі рівні інтергармонік (0,01-0,02%) були виміряні при напругах рівня передачі без відомих великих інтергармонікових джерел. Навіть із відомими інтергармонічними джерелами напруги інтергармонічні рівні рідко перевищують 0,5% основної напруги за винятком умов резонансу. Ці інтергармонічні величини приблизно на порядок нижчі застосованих меж гармонічних спотворень.

1.1.3 Інтергармонічні ефекти

Інтергармоніки як і гармоніки додають в систему живлення додаткові сигнали. Ці додаткові сигнали можуть викликати ряд ефектів особливо якщо вони посилені резонансом. Чим ширший діапазон частот тим більший ризик резонансу. Багато ефектів інтергармонік подібні до ефектів гармонік але деякі є унікальними для інтергармонік через їхню неперіодичну природу.

Ефекти інтергармонік аналогічні ефектам гармонік викликаним додатковим сигналом накладеним на основний, можна розділити на три категорії: перевантаження, коливання і спотворення. Наслідки перевантажень включають додаткові втрати енергії які можуть призвести до нагрівання перевантаження фільтрів або інших компонентів системи і насичення трансформатора струму. В залежності від їх частоти ці додаткові сигнали можуть викликати коливання в механічних системах, акустичні перешкоди або створювати перешкоди для телекомунікаційних сигналів. Спотворення основної частоти форма сигналу може заважати роботі обладнання синхронізованого з перетином нуля системи або залежить від постійної напруги на гребені такого як люмінесцентні лампи, пристрої синхронізації і деяке електронне обладнання.

Два найбільш поширених і ефективних ефектів інтергармонік які не є проблемними з гармонійними спотвореннями - це мерехтіння світла і перешкоди в лінії електропередачі, для яких потрібні неперіодичні сигнали.

Мерехтіння світла викликане змінами середньоквадратичної величини напруги. Помітність мерехтіння залежить від частоти і величини цих коливань напруги. Залежність середньоквадратичної зміни напруги від частоти постійної інтергармоніки амплітудою 0,2% показана на (рис. 5). На цьому рисунку показано, що вплив на мерехтіння інтергармонійних частот вище другої гармоніки є мінімальним. Практично всі типи освітлення можуть бути схильні до мерехтіння, але інтенсивність мерехтіння може варіюватися для різних типів освітлення коли вони піддаються впливу відхилень напруги однакової величини і частоти.



Рисунок 5 - Середньоквадратичне відхилення напруги з спотворенням 0,2%
(Система 50Гц)

Лінія зв'язку були обговорені раніше як джерело інтергармонік. Сигнали захисту та керування пульсаціями зазвичай складаються з однієї інтергармонічної частоти. На них зазвичай не впливають інші інтергармоніки, які мають меншу величину або не відповідають їх частоті. Двосторонній зв'язок, який покладається на ступінчасті зміни системної напруги або струму для передачі бітів інформації, складається з кількох частот між гармоніками. Інтергармонійні спотворення створені зв'язком по лінії

електропередачі несе інформацію, яку можна інтерпретувати після видалення сигналу 60Гц та його гармонік. Якщо інтергармоніки від інших джерел знаходяться в тому ж діапазоні частот, що й сигнали зв'язку лінії електропередачі вони можуть заважати інтерпретації сигналу, що ускладнює завершення зв'язку по лінії електропередачі.

Сигнали лінії електропередачі також можуть викликати мерехтіння. Хоча ці сигнали зв'язку розроблені так щоб бути занадто малими і щоб викликати мерехтіння, вони як відомо викликають мерехтіння дуже чутливого освітлення (компактного флуоресцентного з індуктивними баластами). Якщо система зв'язку лінії електропередачі ненадійна одним з рішень може бути збільшення величини сигналу. Це виправлення має обмеження оскільки занадто сильне збільшення величини сигналу може призвести до мерехтіння навіть при менш чутливому освітленні.

1.1.4 Вимірювання інтергармонік

Методи які зазвичай використовуються для вимірювання частотних компонентів сигналу використовують цикл фазової автосинхронізації для синхронізації вимірювання з основною частотою. Потім сигнал аналізується за допомогою перетворення Фур'є з одного або кількох циклів. Це точно представляє форму сигналу лише якщо вона не містить неперіодичних (інтергармонічних) компонентів. перетворення Фур'є використовує конкретне вікно вимірювання (період часу - T , $1/T$ = частота) та обмежену кількість вибірок цього вікна. Вважається, що сигнал за вікном ідентичний сигналу всередині вікна. Вимірювання інтергармонік які є нецільовими кратними основній частоті можуть змінюватися з часом і їх вимірювання є більш складним.

При наявності інтергармонічних компонентів найбільший загальний розподільник усіх компонентних частот в сигналі де частота Фур'є не є основною частотою і може бути досить малим. Це може значно збільшити мінімально прийнятний час вибірки, необхідний розмір вибірки та загальну складність обчислень. Наприклад, сигнал з основною частотою 60Гц, інтергармонікою 71,2Гц і гармонікою 3000Гц має основну частоту Фур'є 0,2Гц. Відповідний період становить 5 секунд і використовуючи КСН, мінімальна частота вибірки 12000Гц. Це призводить

до розміру вибірки, частоти (12000Гц) і періоду (5 секунд) у 60000. Без інтергармонік мінімальна частота дискретизації залишиться незмінною (12000Гц) але мінімальний час вимірювання становитиме один цикл 60Гц, 16. 67 мілісекунд, що призводить до розміру вибірки 200 (12000Гц * 0,01667секунди). У цьому прикладі включення інтергармоніки 71,2Гц збільшує час вимірювання та розмір вибірки в 300 разів.

Щоб спростити процес вимірювання та отримати повторювані результати, ІЕС 61000-4-76 використовує метод заснований на концепції групування. Для системи 60Гц її основою є аналіз Фур'є який складається з 12 основних циклів який використовує цикл фазового автопідстроювання який синхронізований з основною частотою. Це призводить до отримання спектру з роздільною здатністю 5Гц.

Цей аналіз виробляє гармоніки на частотах кратних основним і інтергармонікам кожні 5Гц між частотами гармонік. Ці гармонійні та інтергармонічні компоненти потім можуть бути згруповані в гармонічні групи. Інтергармонічні групи, гармонійні підгрупи і Інтергармонічні підгрупи показані на (рис. 6). Величина кожної групи або підгрупи розраховується шляхом вилучення квадратного кореня з суми квадратів компонентів кожної групи або підгрупи. Відповідно до стандарту ІЕС 61000-4-7 інтергармонійна група нижча основної частоти (субгармонічної) - інтергармонічний 0, інтергармонічна група між основною і другою гармонікою-інтергармонічна 1. Не всі інтергармонійні вимірювачі слідує цій угоді і замість цього позначають інтергармонійну групу нижче основної частоти як інтергармонійну 1, інтергармонійна група між основною і другою гармонікою є інтергармонійною 2. Одні і ті ж розрахунки використовуються як для напруги, так і для струму.

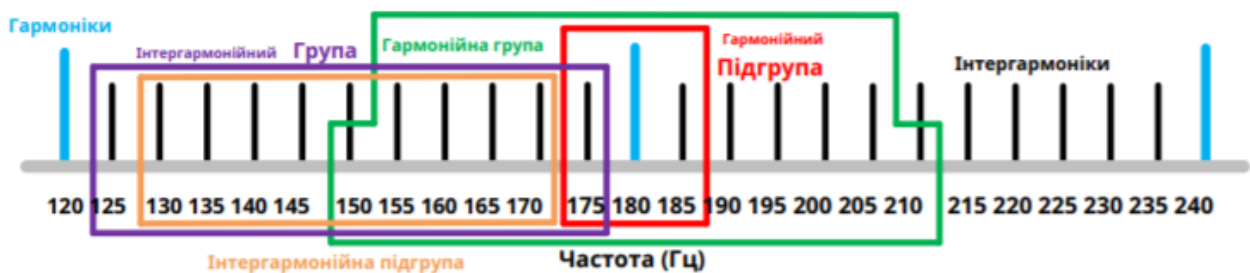


Рисунок 6 - Гармонічні та інтергармонійні групи та їх підгрупи

Величина будь-якої інтергармонічної групи являє собою квадратний корінь із суми квадратів величин інтергармонік в цій групі. Наприклад величина другої інтергармонічної групи або простіше кажучи другої інтергармоніки показана на (рис. 6), являє собою квадратний корінь із суми квадратів величин інтергармонічних складових від 125Гц до 175Гц. (форм. 5) - це рівняння яке використовується для обчислення величини інтергармонічної групи N з 11 величин інтергармонічних складових (Y) між N і $(N+1)$ гармоніками:

$$IG_N = \sqrt{\sum_{k=1}^{11} Y_{(60Hz*N*+5Hz*k)}^2}, \quad (5)$$

Розрахунок ВІП видаляє інтергармонічні компоненти найбільш близькі до кожної з гармонік з розрахунку інтергармонічної групи (форм. 6):

$$ВІП_N = \sqrt{\sum_{k=2}^{10} Y_{(60Hz*N*+5Hz*k)}^2}, \quad (6)$$

Розрахунок величини гармонічної групи включає частоту гармонік і всі інтергармонічні компоненти найбільш близькі до цієї частоти гармонік. Так як інтергармонічні складові вище 30Гц і нижче 30Гц кожної гармоніки рівні відстані від кожної гармоніки половина величини обох цих складових включена в розрахунок (форм. 7):

$$HG_N = \sqrt{\frac{1}{2} Y_{(N*60Hz-30Hz)}^2 + \sum_{k=5}^1 Y_{(60Hz*N*+5Hz*k)}^2 + \frac{1}{2} Y_{(N*60Hz-30Hz)}^2}, \quad (7)$$

Розрахунок ВІГ включає тільки частоту гармонік і інтергармонічні компоненти що безпосередньо примикають до частоти гармонік зображено на (форм. 8):

$$ВІГ_N = \sqrt{\sum_{k=-1}^1 Y_{(60Hz*N*+5Hz*k)}^2}, \quad (8)$$

Загальне гармонійне спотворення розраховується як квадратний корінь із суми квадратів усіх окремих гармонічних складових, що мають значне значення.

Аналогічно загальне інтергармонійне спотворення можна розрахувати взявши квадратний корінь із суми квадратів усіх інтергармонічних груп.

1.1.5 Інтергармонічні стандарти, рекомендації та обмеження

Ефекти інтергармонік можна розділити на три категорії: 1) ті, що пов'язані з мерехтінням, 2) подібні до гармонік, 3) ті, що впливають на зв'язок лінії електропередач. Оскільки ці явища різні межі необхідні для запобігання проблем з енергосистемою через кожену з них також різні.

Стандарт IEEE 519-2014 містить інформативні межгармонічні межі, призначені для запобігання мерехтіння. ІЕС 61000-2-2: 20027 містить подібні «стандартні рівні сумісності» для «інтергармонічних напруг які відбуваються на частоті близькій до основної (50Гц або 60Гц), що призводить до амплітудної модуляції напруги живлення». Обидва стандарти обмежують інтергармоніки, що викликають великі занепокоєння для мерехтіння частот нижче другої гармоніки. Інформаційні межі інтергармонічної напруги IEEE на основі мерехтіння є на 5%нижче 16Гц, вище 104Гц і дуже близько до 60Гц, звичайно немає обмежень у 60Гц. Межа становить всього 0,23% при частотах 51 і 69Гц. Ці інформативні інтергармонічні межі напруги зображені графічно на (рис. 7).

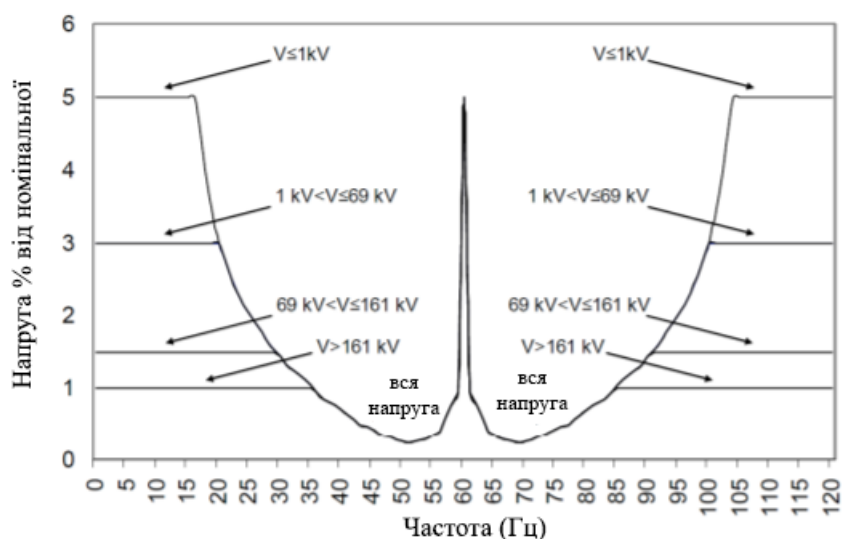


Рисунок 7 - Інформаційні межі гармонійної напруги IEEE 519 на основі вимірювання для частоти до 120Гц і для системи 60Гц

За межами інтергармонічних обмежень заснованих на мерехтінні IEEE 519 надає мало вказівок щодо обмежень мерехтіння через ефекти подібні до ефектів гармонійних спотворень або для вирішення проблем зв'язку в лінії електропередачі. У стандарті зазначається, що «вплив інтергармонік на інше обладнання як механічні системи генераторів, двигуни, трансформатори, системи сигналізації та зв'язку і фільтри слід «належним чином враховувати» і «слід розробляти відповідні межі гармонійного струму для кожного конкретного випадку використовуючи конкретні знання системи постачання, підключених навантажень користувачів та забезпечення майбутніх користувачів».

У ІЕС 6100-2-2 говориться, що в системі недостатньо знань про інтергармоніки, щоб можна було домовитися про межі сумісності що перевищують межі для мерехтіння але наводяться деякі обговорення того як можуть виглядати ці межі. Для проблем аналогічних проблемам гармонік вони припускають, що межі повинні бути аналогічні межах гармонік. Зокрема вони припускають, що кожна інтергармонійна частота повинна мати опорний рівень, рівний рівню сумісності для наступної більш високої парної гармоніки. ІЕС обмежує напруги 2-й гармоніки мережі низької напруги до 2%, напруги 4-й гармоніки до 1%, напруги 6-ї і 8-ї гармонік до 0,5% і навіть гармонійні напруги з 10-ї по 50-ту до $(0,25 \cdot (10/\text{год}) + 0,25)\%$. Межі гармонійної напруги IEEE 519 низької напруги ($< 1\text{kV}$) становлять 5 % для всіх окремих гармонік і 8% для загального гармонійного спотворення. Навіть межі гармонійного струму для систем з номінальною напругою від 120В до 69кВ більш складні, вони залежать від відношення струму короткого замикання до струму навантаження а також частоті. Ці межі варіюються від 0,075% для високих частот (35-ї гармоніки і вище) з низьким коефіцієнтом короткого замикання (< 20) до 3,75% для низьких частот (нижче 11-ї гармоніки) з високими коефіцієнтами короткого замикання (> 1000).

Стандарт ІЕС розглядає приймачі управління пульсаціями як особливий випадок. Можна очікувати, що приймачі будуть правильно реагувати на напругу до 0,3% від напруги живлення. Більш високих рівнів відгуку зазвичай уникають залежно від частоти оскільки вони ризикують викликати мерехтіння. ІЕС пропонує обмежити

інтергармоніки поблизу частоти управління пульсаціями до 0,2% від напруги живлення.

Межа інтергармонійної напруги вище 0,2% може бути прийнятним для систем зв'язку з більш широким спектром, якщо він застосовується не для однієї частоти а для повного інтергармонійного спотворення. Ця межа все одно повинна бути значно нижчою меж гармонік. Застосування таких обмежень в масштабах всієї системи може виявитися непрактичним при наявності сучасного обладнання енергосистеми, яке може створювати значно вищі інтергармоніки. За цих обставин розумно розробляти інтергармонійні обмеження в кожному конкретному випадку. На жаль без загальносистемних обмежень проектування обладнання та систем ускладнено.

Вища 50-ї гармоніки частота гармонійна або інтергармонійна має мало значення. ІЕС пропонує обмежити будь-яку частоту від 50-ї гармоніки до 9кГц 0,2%, а будь-яку смугу 200Гц в цьому діапазоні до 0,3%.

Жодне з цих запропонованих обмежень не підлягає виконанню і немає єдиної думки щодо того чи є вони занадто консервативними або занадто ліберальними. Спроби розробити обмеження які не дозволили б інтергармонікам пошкодити або привести до неправильної роботи обладнання енергосистеми та лінії електропередачі знаходяться на ранніх стадіях розробки. Одна річ яка стає зрозумілою полягає в тому що межі необхідні для забезпечення зв'язку по лінії електропередачі можуть бути приблизно на порядок нижчі ніж ті які необхідні для запобігання проблем пов'язаних з мерехтінням або гармонікою. Майбутнє інтергармонійних меж буде залежати від переваги інтергармонійного генеруючого обладнання яке б дозволяло системі знизити витрати на те щоб зробити інші обладнання несприйнятливими до впливу інтергармонік.

1.1.6 Інтергармонічне пом'якшення

Ефекти інтергармонічного спотворення можна пом'якшити за допомогою трьох методів які також застосовуються до гармонійних спотворень: зниження рівня випромінювання, зниження чутливості до навантаження та зменшення зв'язку між обладнанням, що генерує спотворення і чутливі навантаження. Широка смуга

природи і змінності інтергармонічних спотворень, що випромінюються від певних видів навантажень можуть становити всі три методи пом'якшення складніші для інтергармонік ніж для гармонік.

Зменшення рівнів інтергармонічних випромінювань є складним оскільки зменшення інтергармонік може також зменшити переваги обладнання, що виробляє інтергармоніки такого як незалежне виробництво або споживання змінної енергії та гасіння коливань від пристроїв з електронним керуванням. Інтергармоніки від дугових навантажень і зварювальників не можна зменшити без зниження ефективності процесу. Аналогічно зменшення інтергармонік від систем зв'язку ліній електропередач може знизити їх ефективність.

Зменшення чутливості навантажень до інтергармонік у деяких випадках можна здійснити способами подібними до зменшення чутливості навантаження гармонік. Якщо додатковий інтергармонійний сигнал створює проблеми з перевантаженням струму або піками напруги можна використовувати обладнання більш високого номіналу. Проблеми з хронометражем, викликані спотвореним перетином нуля або сигналами напруги можна вирішити за допомогою обладнання яке не синхронізовано з системою живлення. Зв'язок ліній електропередачі складніше модифікувати, щоб зробити їх менш чутливими до інтергармонічних спотворень. Зазвичай вони розроблені таким чином, що силу їх сигналу неможливо значно збільшити, не ризикуючи створити мерехтіння. Хоча одно-частотні сигнали можна модифікувати, щоб уникнути певних чутливих частот сигнали широкого спектру які несуть більше інформації.

Зменшення зв'язку між пристроями, що створюють інтергармонійні коливання, і чутливими навантаженнями зазвичай виконується за допомогою фільтру. Фільтрація може бути практичною, коли є одна або мінімальна кількість інтергармонічних частот, що викликають заклопотаність. При наявності декількох інтергармонік з різними частотами фільтрація може виявитися непрактичною. Пасивні фільтри використовують для шунтування низьких опорів на цільових інтегармонійних частотах які проводять струми на землю. Особливо незатухаючі фільтри з меншими

втратами, можуть значно посилювати нецільові частоти. Коли тільки обмежене число інтергармонічних частот є проблемними, ці посилені частоти можуть бути сконструйовані таким чином, щоб уникнути виникаючих проблем частот. Це може бути практично неможливо, коли необхідно відфільтрувати широкий діапазон інтергармонік.

Основною проблемою під час фільтрації для широкого спектру зв'язку лінії електропередачі є розмір $Mvar$ необхідна фільтрація. Для функціонування лінії електропередачі потрібен більш низький рівень інтергармонік, що означає, що буде потрібна більша (на основі $Mvar$) фільтрація. Розміри фільтрів необхідні для забезпечення широкого спектру потужності зв'язку можуть створити неприйнятне регулювання напруги і питання вартості.

1.1.7 Вплив інтергармонік

Вплив інтергармонік може бути найбільш помітним у повсякденному житті - це мерехтіння світла викликане модуляцією амплітуди напруги. На (рис. 8) показаний сигнал, що містить тільки фундаментальну частоту 50Гц в той час як на (рис. 9) показаний один і той же сигнал з двома інтергармоніками на частотах 48,7Гц і 51,3Гц. Ця інтергармонічна пара (1,3Гц від основної в кожному напрямку) змушує амплітуду модулювати з частотою модуляції 1,3Гц. На (рис. 10) показана модуляція коли присутня тільки одна з цієї інтергармонічної пари.

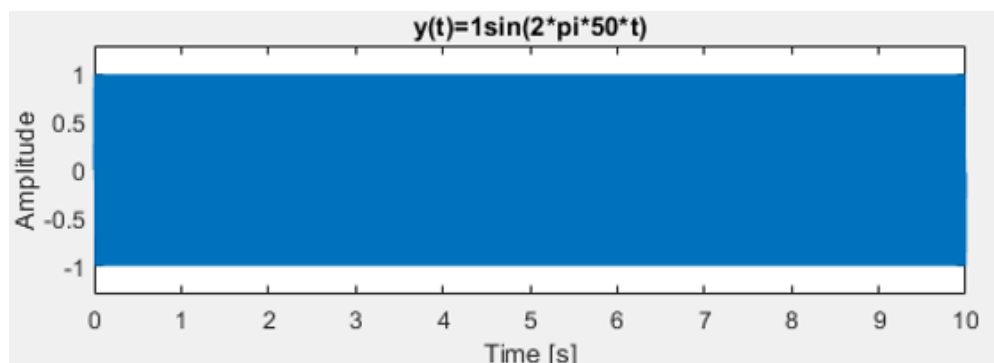


Рисунок 8 – Сигнал, що містить лише основний сигнал

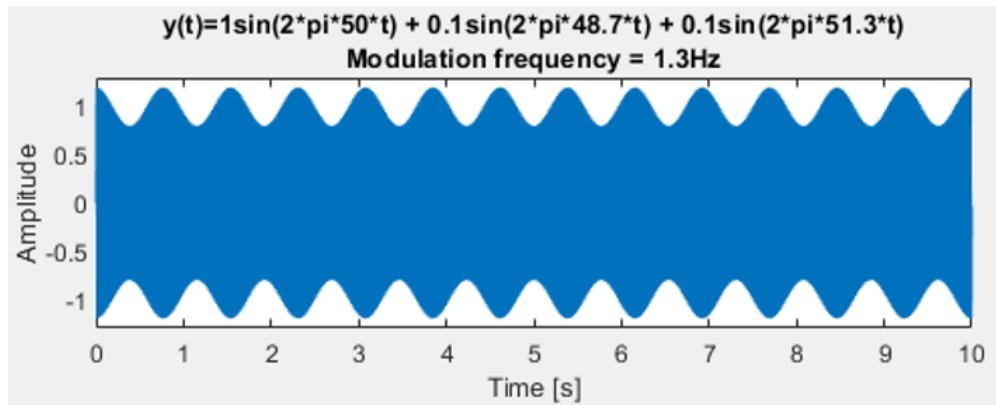


Рисунок 9 - Модульований сигнал, що містить пару інтергармонік

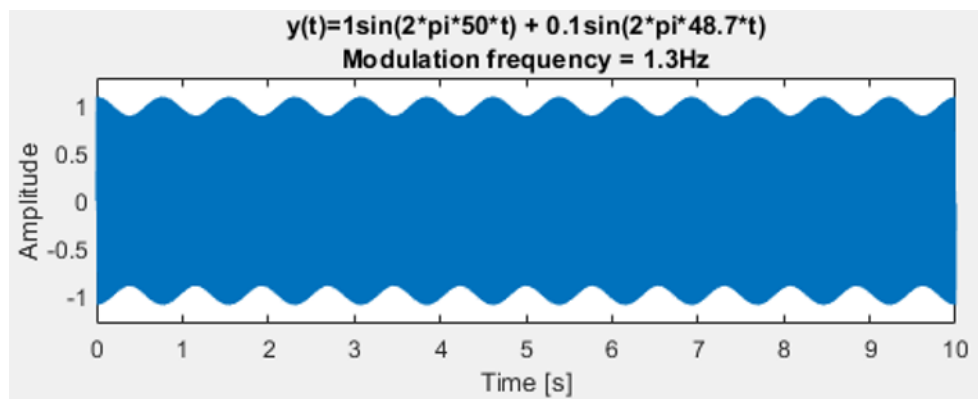


Рисунок 10 - Модульований сигнал, що містить одну інтергармоніку

На (рис. 11) показано, що додавання гармоніки (в даному випадку 100Гц) не викличе амплітудної модуляції.

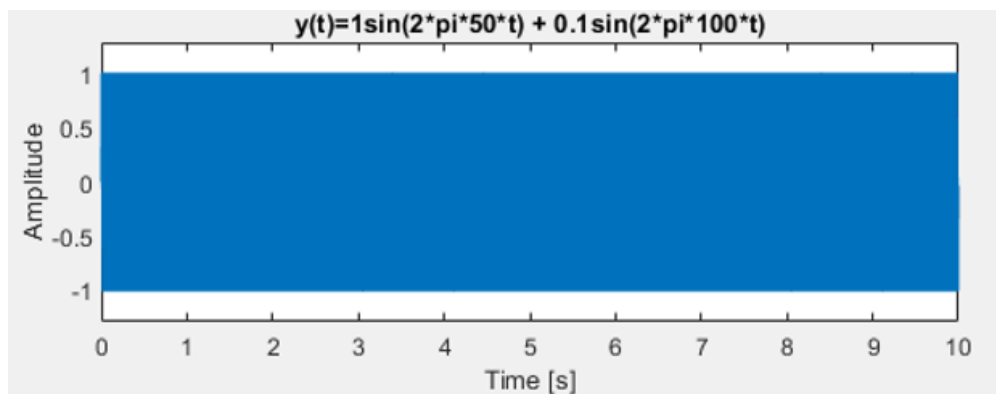


Рисунок 11 - Сигнал, що містить фундаментальну і другу гармоніку

Людське око найбільш чутливе до частот модуляції близько 8Гц. Різні типи ламп реагують на коливання напруги по різному. Наприклад світність лампи розжарювання залежить від напруги RMS поперек, в той час як це коливання пікової напруги, що викликає занепокоєння у розвантажувальній лампи з електронним баластом.

Відносне коливання RMS визначається відповідно до (рис 12):

$$\left(\frac{\Delta V}{V}\right)_{RMS} = \frac{(V_{RMS\ max} - V_{RMS\ mix})/2}{V_{RMS\ fundamental}} \cdot 100\%, \quad (9)$$

де $V_{RMS\ max}$ - максимальне значення RMS на певній інтергармонічній частоті а $V_{RMS\ mix}$ відповідне мінімальне значення. На (рис. 12) показано відносне коливання RMS , коли додається інтергармоніка з амплітудою 0,2% від основної. Очевидно, що для більш високих частот відносні коливання RMS стають меншими.

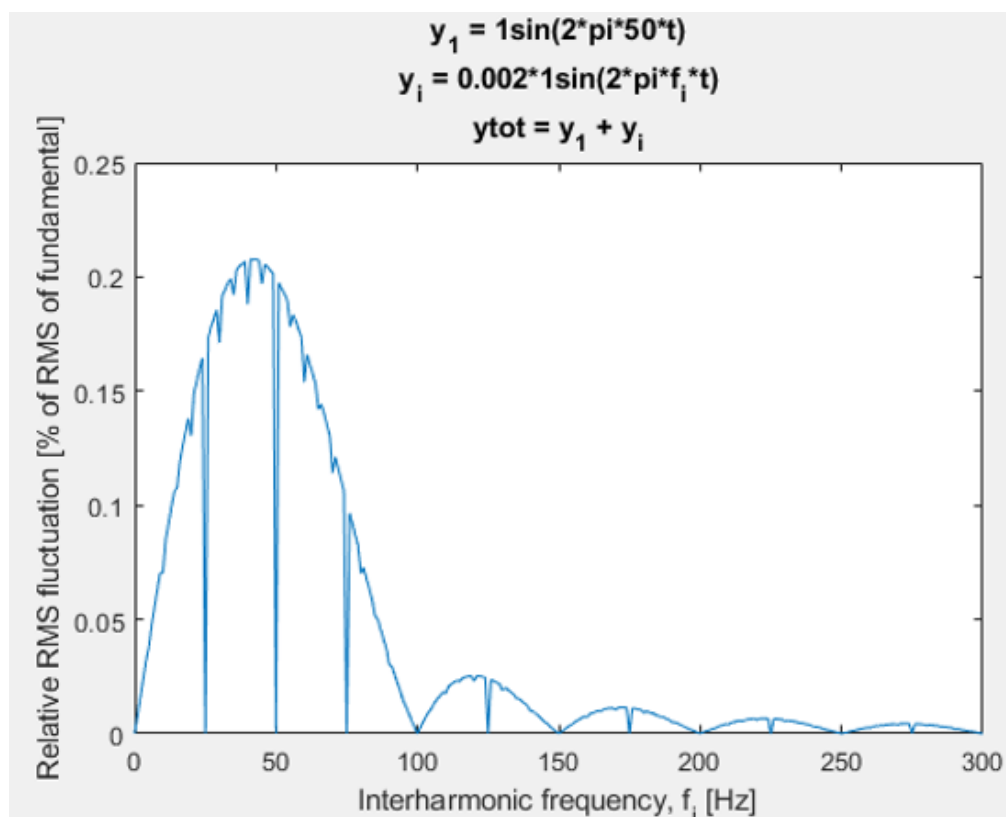


Рисунок 12 - Відносне коливання RMS при наявності інтергармоніки з амплітудою 0,2% від основної

Максимальні та мінімальні значення RMS обчислювалися кожні 0,02с (період 50Гц) до моменту досягнення $1 / f_{fourier}$ де $f_{fourier}$ визначається як найбільший спільний дільник 50Гц і f_i . Це було зроблено для кожної інтергармонічної частоти від 0 до 300Гц, кроками по 1Гц.

Мерехтіння світла викликає не єдине занепокоєння щодо таких коливань напруги в системи живлення такі компоненти як трансформатори, двигуни та генератори також можуть зіткнутися з серйозними проблемами.

Іншими поширеними ефектами інтергармонік є коливання низької частоти в механічних системах, насичення трансформаторів струму, телекомунікаційні перешкоди, порушення роботи обладнання, перешкоди керуванню сигнали в лініях живлення та інші.

1.2 Сучасні методи дослідження і визначення інтергармонік

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. Можна зазначити що у багатьох випадках обидва механізми відбуваються одночасно.

Джерелами інтергармонік є споживачі, які працюють постійно або тимчасово в перехідному режимі. Цей режим обумовлений або зміною навантаження, пов'язаного

з режимом технологічних процесів, або особливостями електромагнітних процесів, що супроводжують роботу електроприладів, наприклад напівдуплексна робота перетворювача частоти на випрямлення. У першому випадку процеси зміни струму (напруги) характеризуються випадковістю або неперіодичністю. У другому випадку, якщо ефектами випадкових втручань нехтують, процеси зміни струму (напруги) джерел інтергармонік можна розглядати як періодичні. Цей підхід можна застосувати як до аналізу, так і для обчислення інтергармонік, сформованих різними джерелами.

Інтергармоніки виникають внаслідок модуляції основної частоти і гармонік іншими частотними компонентами і спостерігається під час експлуатації статичних перетворювачів частоти, зокрема циклоконверторами, асинхронними двигунами ІЧ, асинхронними перетворювальними каскадами, дуговими печами, зварювальними машинами тощо. Через це дослідження їх виникнення, поширення і агрегації важливе для забезпечення якості та надійності від джерела живлення.

Аналіз гармонік та інтергармонік завжди викликав серйозну стурбованість при проблемах якості енергії, контролем, а також захистом енергосистеми. В даний час існує цілий ряд алгоритмів аналізу форми хвилі струму і напруги. Оцінка їх ефективності включає в себе визначення точності і швидкодії. Припускаючи стаціонарну умову для гармонік, яка, як правило, має місце у порівнянні з іншими порушеннями якості енергії, гармонійний аналіз може виконуватися в частотній області шляхом впровадження ДПФ та його розвиненої моделі, що називається ШПФ, в основі якого лежить уявлення про те, що будь-яку періодичну функцію можна представити у вигляді суми окремих гармонійних складових (синусоїд н косинусоїд з різними амплітудами, частотами) - розкладання в ряд Фур'є.

З досвіду вимірювання та аналізу показано, що при наявності інтергармонічних компонентів у сітці пряма реалізація ШПФ може призвести до неточного аналізу частот та проблеми спектральної витоку. Такі неточності також можуть статися, коли основна частота мережі також свідчить про деякі відхилення від номінального значення, головним чином через невідповідність потужності між джерелом та навантаженням. Після вищезгаданих труднощів в останні роки було запущено багато

досліджень для оцінки параметрів гармонічних та інтергармонічних компонентів енергосистем з прийнятним рівнем точності, класифікація яких зображена на (рис. 13).

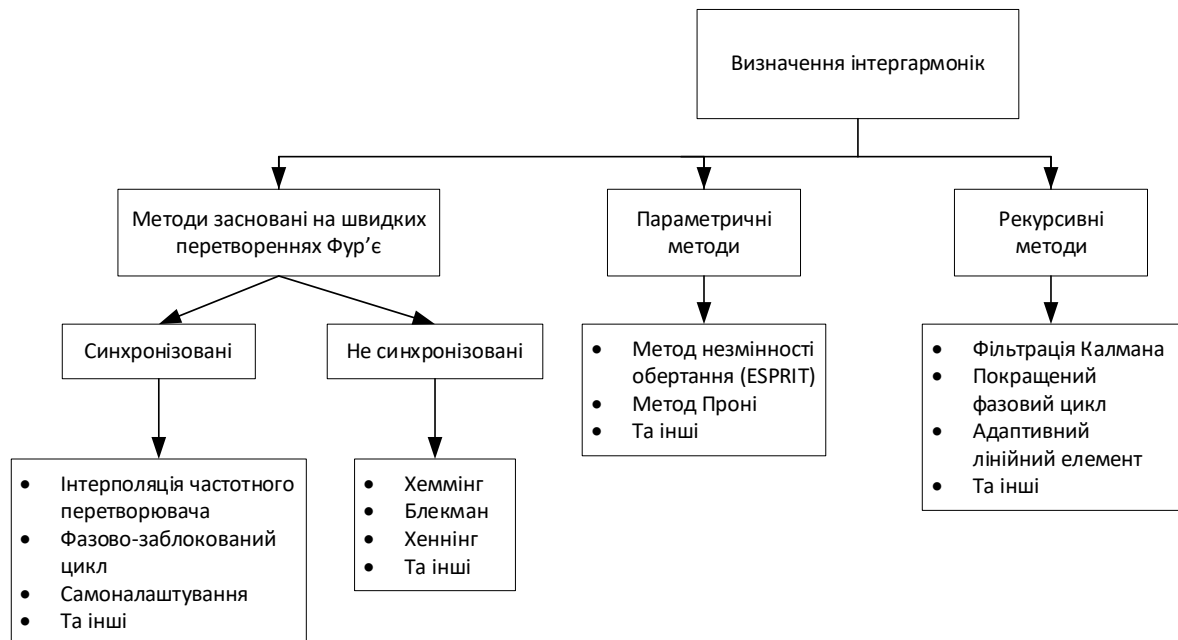


Рисунок 13 - Класифікація методів визначення інтергармонік

Варіація частоти енергосистеми істотно впливає на точність ШПФ, коли використовується фіксована частота дискретизації. Більш того, ефект пікетування, який може виникнути через прийняття недостатніх основних частотних циклів, може призвести до неточної оцінки наявності інтергармонічних елементів.

1.2.1 Визначення інтергармонік з графіка стохастичних процесів

Для визначення амплітуд і частот інтергармонік, можна застосувати перетворення Фур'є безпосередньо до графіки стохастичних процесів, що описують фактичні об'ємні струми $I(t)$ та обсяги $U(t)$. Цей розклад робиться для реалізації на конкретному проміжку. Гармонійний аналіз можна легко провести за допомогою ШПФ.

Енергія інтергармонік відповідно до графів $I(t)$ приймається як сума реальних значень квадратів. Значення енергії визначаються площею обмеженою кривою $I(t)$ і чисельно дорівнює до дисперсії процесу. Щоб отримати спектральний склад

періодичних компонентів, можна застосувати ШПФ до «хвоста» кореляції функції, таким чином, поступаючи спектру квадратів інтеграмонік.

Дискретний спектр дозволяє оцінити співвідношення між енергією інтеграмонік та загальною вартістю енергії процесу $I(t)$. Дослідження довели, що частка інтеграмонічної групи дискретного спектру енергії в електричних мережах з електротехнічних одиниць складає 10-25% від загальної енергії процесу змішаного спектра.

1.2.2 Визначення інтеграмонік параметричний методом

У несинхронізованих умовах параметричні методи можуть бути застосовані для забезпечення частотного спектру вибіркового сигналу з високочастотним дозволом, який зображено на (рис. 14). Оцінка параметрів сигналів за допомогою методів незмінності обертання ESPRIT та методу на основі Проні є одними з найбільш часто використовуваних параметричних підходів. У цих методах порядок оцінки та перешкоди від шуму мають значний вплив на результати вимірювань. Кількість обчислювань також може збільшуватися, коли потрібна висока точність.

Параметричний метод ESPRIT застосовується до всієї послідовності даних, і він використовує синусоїдальні моделі для оцінки частот та амплітуд сигналів вибірки. Проблема оцінки параметрів сигналу в нестационарних даних розглядається з використанням подовжувального вікна, яке дуже схоже на КПФ, яке вже успішно застосовується протягом багатьох років.

У методі Проні обраний сигнал апроксимується лінійною комбінацією складних кон'югованих експонент (поліноми), і він не характеризується фіксованим частотним дозволом. Невизначені множники коефіцієнтів для ідентифікації частотних компонентів можуть бути отримані з різними підходами, такими як автокореляція, коваріація, авторегресія та методи розкладання сингулярного значення. У разі наявності сигналу, що змінюється, для оцінки параметра може застосовуватися адаптивний метод Проні.

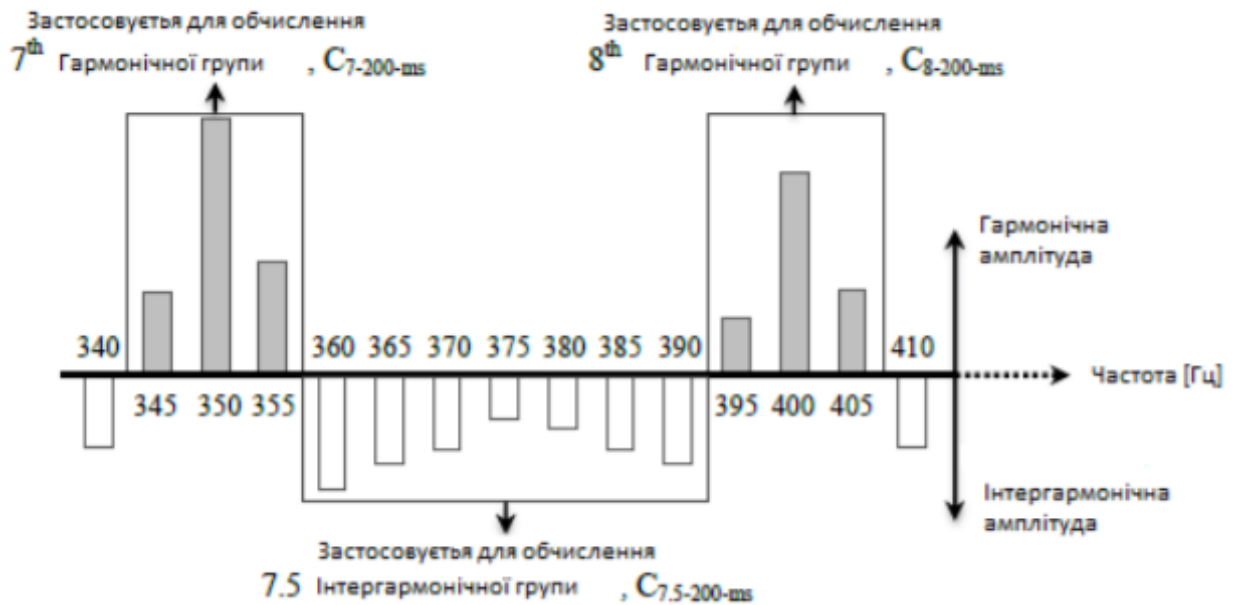


Рисунок 14 - Гармоніки і інтергармоніки згруповані за IEC 61-000-4-30

1.2.3 Визначення інтергармонік рекурсивним методом

Рекурсивний метод, як правило, є параметричним методом, який передбачає більше знань про спектр аналізованого сигналу. Для того, щоб оцінити параметри сигналу, слід обрати правильну модель. Фільтрація Калмана АЛЕ та ПФЦ розглядаються як найпоширеніші методи рекурсії.

Фільтрація Калмана - це метод оцінки стану на основі оптимального оцінювача з мінімальною коваріацією помилок. Він вводить набір динамічних рівнянь стану та набір рівнянь спостережень для даних. Для того, щоб точно оцінити параметри, необхідно добре знати про динамічний процес та модель вимірювання. Метод АЛЕ забезпечує адаптивний фільтр для шумопоглинання та вилучення сигналу. Враховуючи великий порядок оцінювання в даному методі, він сприяє важким обчислювальним навантаженням. Метод ПФЦ, здатний оцінити частоту, амплітуду та фазовий кут сигналу, насправді працює як смуговий фільтр. Таким чином, для гармонійної та інтергармонійної оцінки через ПФЦ, потрібно скласти декілька серій і паралельних з'єднань.

Як правило, рекурсивні методи переважно підходять для гармонійної оцінки, а не для інтергармонік, оскільки місця інтергармонік не надаються заздалегідь, і тому

вони не розглядаються в моделі сигналу. Для впровадження цих методів для оцінки інтергармонік необхідно розширити основи розкладання, що може спричинити численну нестабільність та проблеми конвергенції.

1.2.4 Дискретне перетворення Фур'є

При виконанні ДПФ зразка сигналу, довжина або розмір вікна сигналу має велике значення. Щоб уникнути спектрального витоку, розмір вікна повинен бути обраний таким чином щоб він був оберненим найбільшим спільним дільником всіх частот присутніх в сигналі. Інший спосіб сказати що роздільна здатність ДПФ повинна бути найбільшим спільним дільником всіх частот присутніх у сигналі, так званих частот Фур'є. Наприклад якщо сигнал містить лише компонент 50Гц, довжина вікна повинна бути 0,02с, що відповідає одному періоду 50Гц, де 50Гц також є частотою Фур'є в цьому випадку. Якщо сигнал також містить другу гармоніку 50Гц, тобто 100Гц, частота Фур'є все ще становить 50Гц, а довжина вікна не обов'язково повинна бути збільшена. Однак якщо сигнал містить, скажімо 51Гц, а також 50 Гц і 100 Гц, то частота Фур'є становить 1Гц, а довжина вікна повинна бути збільшена до 1с. На (рис. 15) зображено ДПФ з належним розміром вікна сигналу що містить лише фундаментальну частоту 50Гц, тоді як на (рис. 16) зображено ДПФ того ж сигналу але з неправильним розміром вікна.

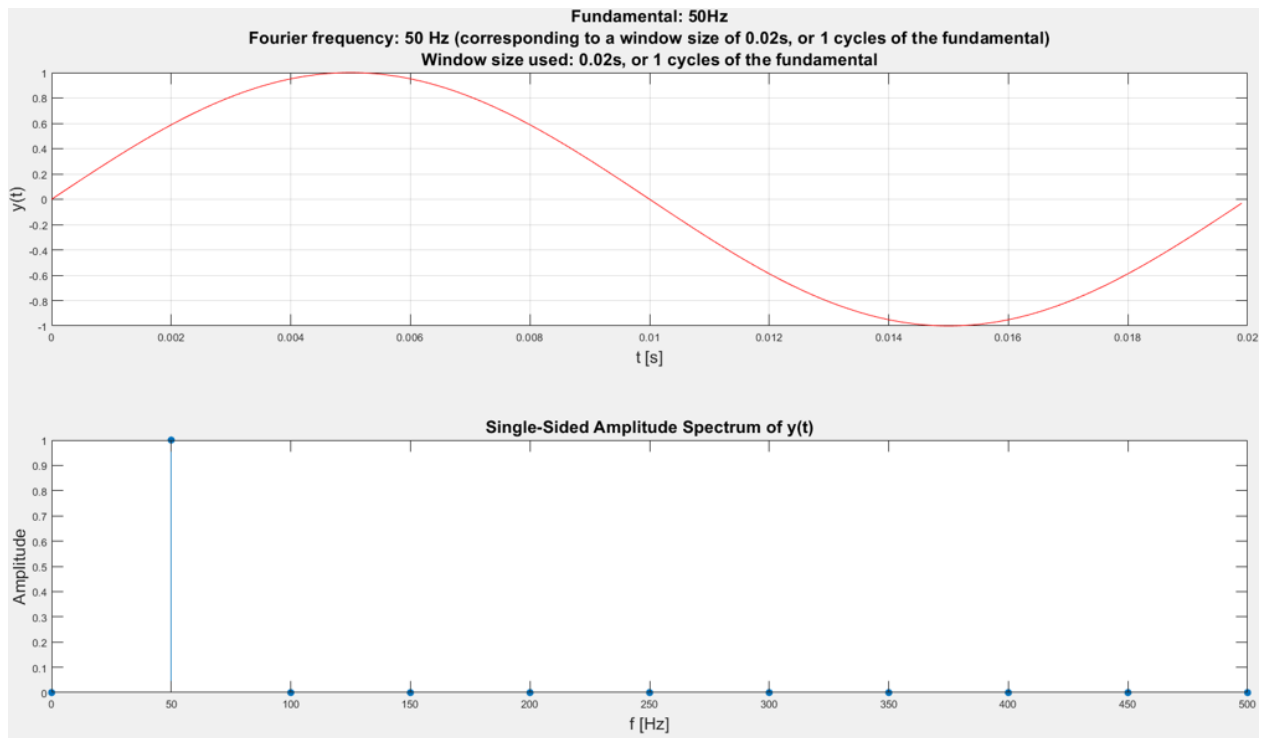


Рисунок 15 - Сигнал що містить лише 50 Гц (амплітуда 1), з належним розміром вікна $0,02 \text{ s} = 1 \text{ період } 50 \text{ Гц}$, що дає частотну роздільну здатність 50 Гц

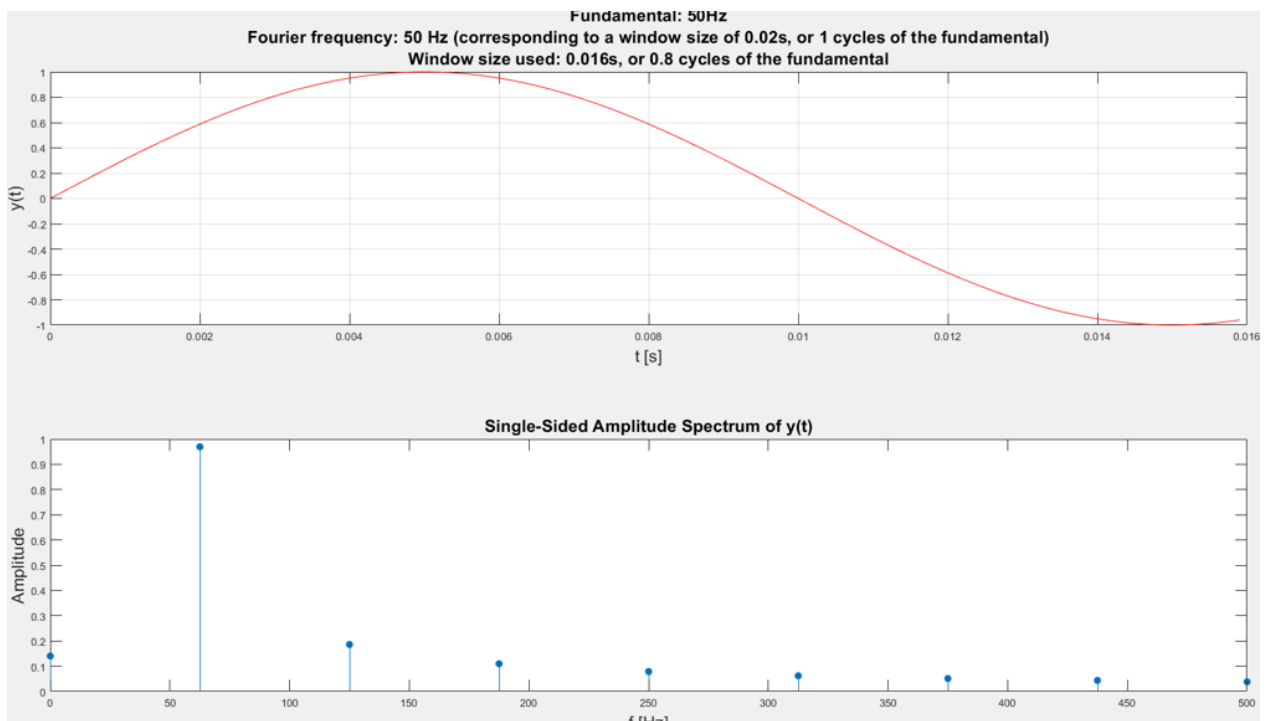


Рисунок 16 - Сигнал що містить лише 50 Гц (амплітуда 1), з неправильним розміром вікна $0,016 \text{ s}$ що відповідає частотна роздільна здатність 62,5 Гц це в свою чергу спричиняє спектральний витік

На (рис. 17) зображено, що якщо присутні тільки гармоніки фундаментальної частоти, розмір вікна не повинен бути збільшений оскільки частота Фур'є залишається незмінною. На (рис. 18) показаний той же сигнал що і на (рис. 17) але з неправильним розміром вікна.

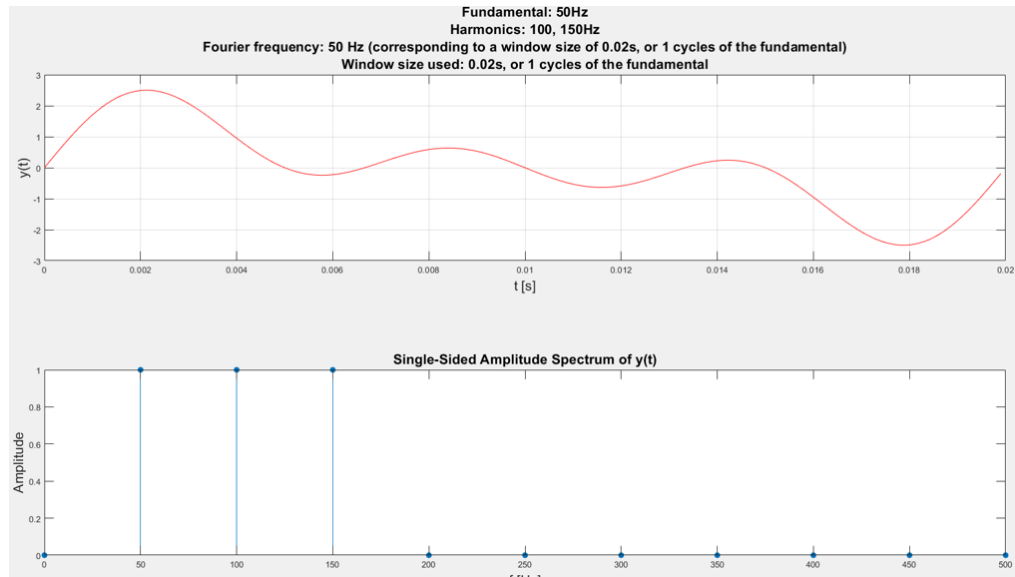


Рисунок 17 – Сигнал що містить основні 50Гц і гармоніки 100Гц і 150Гц (вся амплітуда 1). Правильний розмір вікна 0,02с, що відповідає роздільній здатності частоти 50Гц

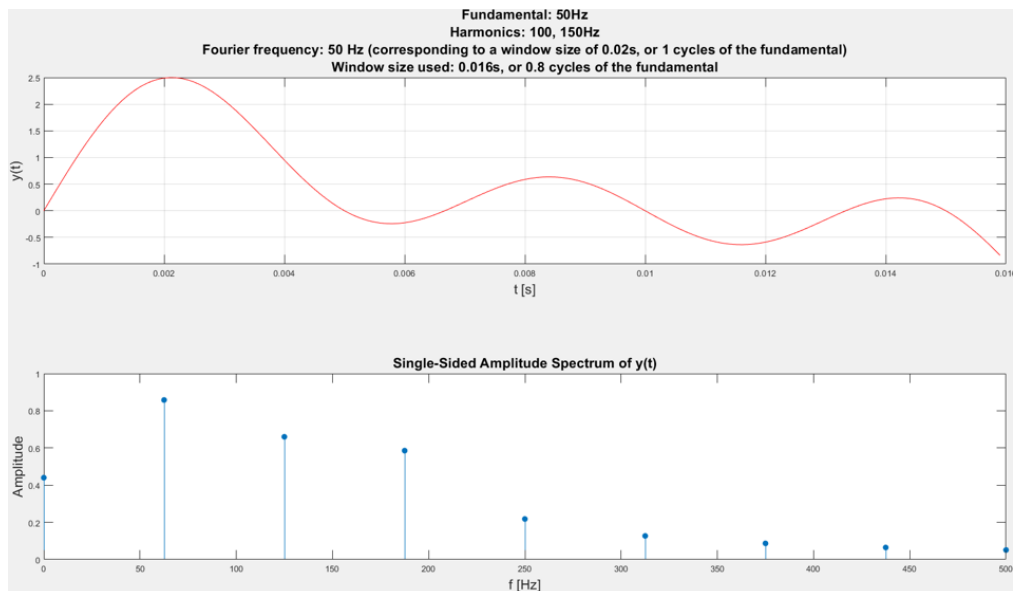


Рисунок 18 - Сигнал що містить основні 50Гц і гармоніки 100Гц і 150Гц (вся амплітуда 1). Неправильний розмір вікна 0,016с, що відповідає роздільній здатності частоти 62,5Гц що викликає спектральний витік

Якщо інтергармоніка присутня як зображено на (рис. 19) і (рис. 20), розмір вікна повинен бути збільшений щоб уникнути спектрального витоку, оскільки частота Фур'є стає меншою. На (рис. 19) розмір вікна повинен був стати в 50 разів більшим, ніж у випадку без інтергармоніки. Якщо використовувати такий же розмір вікна як у випадку без інтергармоніки виявити інтергармонічні частоти буде неможливо як зображено на (рис. 20). Великі розміри вікон необхідні при наявності інтергармонік, є проблемою не тільки обчислювального навантаження але і точності оскільки зазвичай основна частота не є повністю нерухомою.

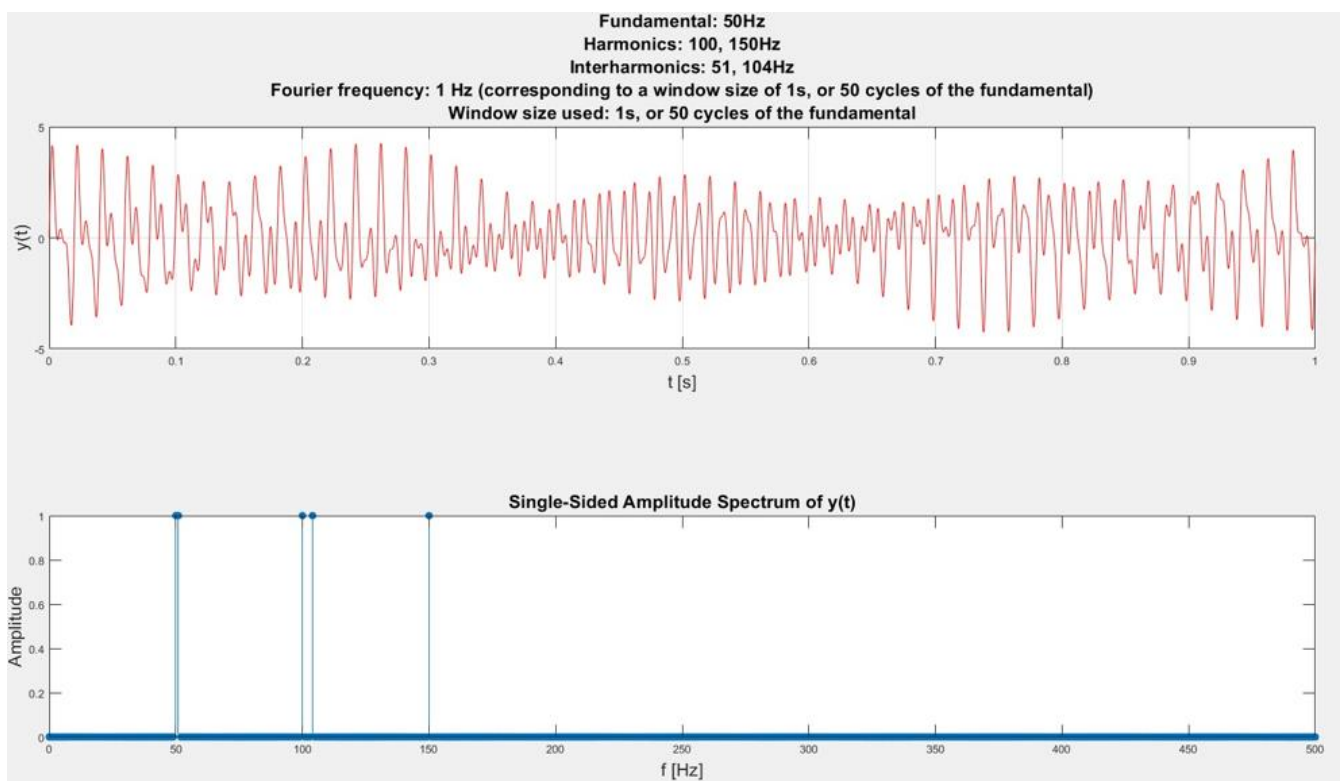


Рисунок 19 - Сигнал що містить основні 50Гц, гармоніки 100Гц і 150Гц, і інтергармоніки 51Гц і 104Гц (вся амплітуда 1). Правильний розмір вікна 1с, що відповідає роздільній здатності частоти 1Гц

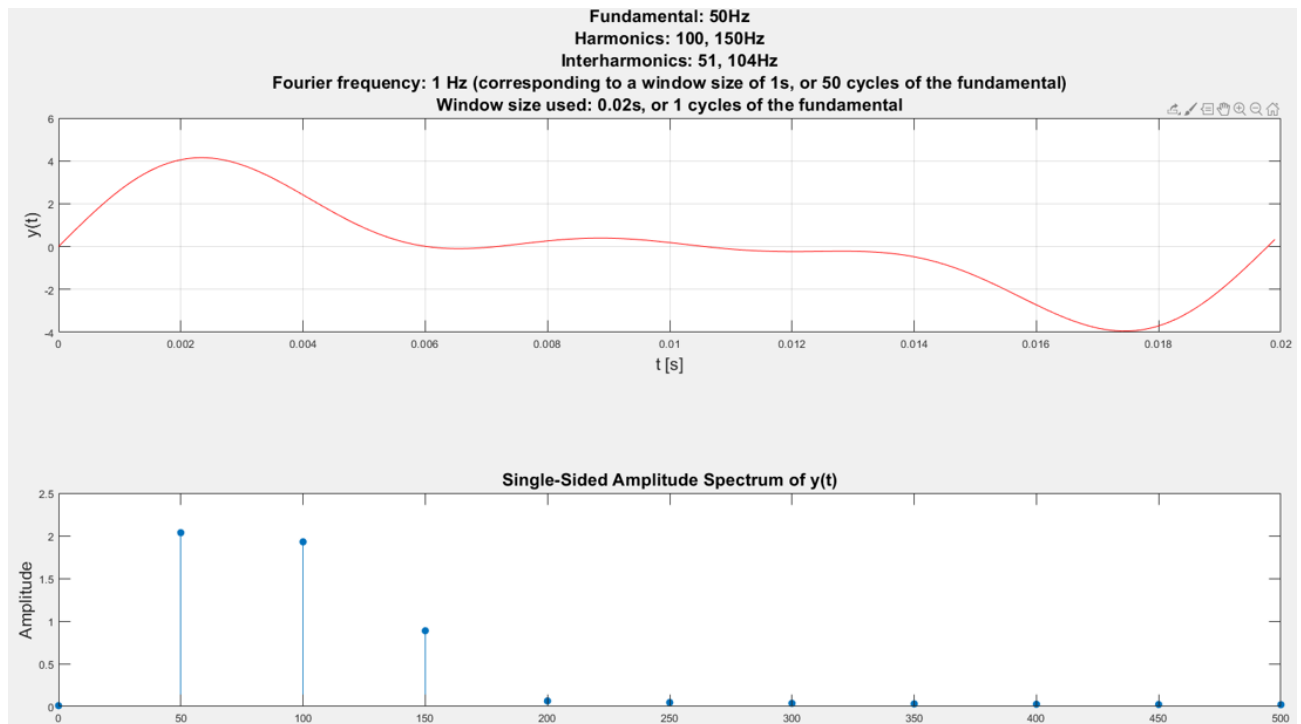


Рисунок 20 - Сигнал, що містить основні 50Гц, гармоніки 100Гц і 150Гц, і інтергармоніки 51Гц і 104Гц (вся амплітуда 1). Неправильний розмір вікна 0,02с, що відповідає роздільній здатності частоти 50Гц призводить до заниженої роздільної здатності частоти для виявлення інтергармоніки

1.2.5 Інтергармоніки і флікер

Флікер або мерехтіння світлового потоку визначено як «суб'єктивне сприйняття флуктуацій (швидких коливань) яскравості освітлення». Це феномен фізіологічної перешкоди, візуально сприймається користувачами електричних джерел освітлення живляться від загального джерела освітлення та електричного навантаження, яка є джерелом виникнення перешкод. Перешкода, відповідна миганню, проявляється на лампах на низькій напрузі. Тоді як електричні навантаження можуть бути підключені на будь-якому рівні напруги.

Раптові коливання напруги мережі є основою цього явища. У цьому визначенні флікера не враховуються тільки коливання:

- величиною менше 10%,
- і за період менше 1 години.

Флікер утворюється головним чином з швидких коливань напруги живлення малої величини, викликаних:

- від зміни потужності, викликані різними приймачами: дуговими на електропечі, зварювальними машинами, двигунами, і т.д.,
- або включенням і відключенням навантажень: пуск двигунів, ступінчаста робота батарей конденсаторів і т.д.

Головним чином, флікер вивчений для ламп розжарювання і є більш-менш значним в залежності від типу джерела світла. Він може бути викликаний не тільки коливанням напруги.

Уже понад 50 років флікер є предметом численних досліджень. Це явище тепер добре визначено (стандарт ІЕС 868), проаналізовано, виміряно, для якого існують елементи прогнозу і протидії.

У всіх індустріальних країнах, розподільники енергії, як і користувачі електрообладнання, повинні дотримуватися допускається відхилення змін амплітуди коливань і частоти в своїх мережах, або правильна робота обладнання не гарантується. Наприклад, у Франції, стандарт EN 50160 фіксує таке допускається відхилення:

- $\pm 10\%$ допускається відхилення для номінальних напруг ПН (Низьке Напруга: $U_n < 1000 \text{ В}$),
- від $+ 6\%$ до $- 10\%$ для напруг ПН 230/400 В, між 1996 і 2003 (міжнародне узгодження),
- $\pm 1\%$ номінальної частоти (50 Гц).

Ще існують такі види коливань напруги, як циклічні коливання, провал напруги, відключення, перенапруги (рис. 21).

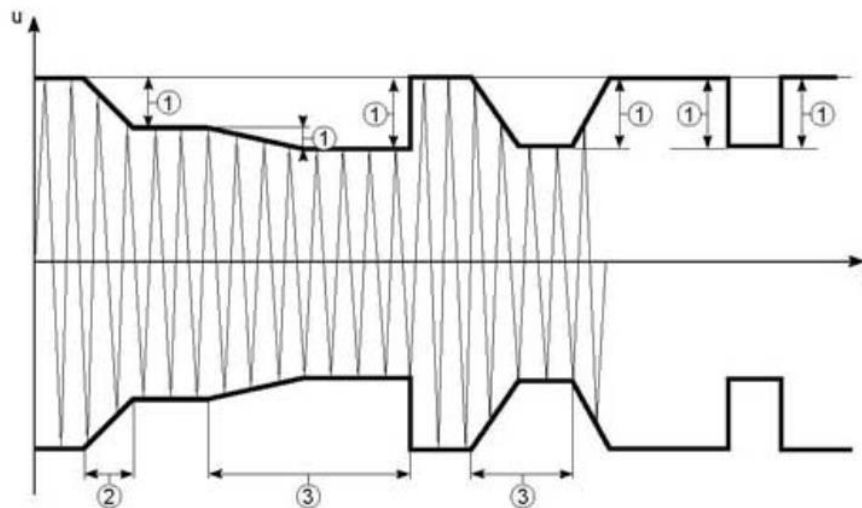


Рисунок 21 - Коливання напруги (1 - коливання напруги; 2 - тривалість коливання напруги; 3 - інтервал між двома коливаннями)

Коливання напруги, які є джерелом флікера. Періодичні та швидкі коливання напруги. Ці періодично змінюються коливання мають спектральне розкладання в смузі частот від 0,5 Гц до 25 Гц.

Вони викликані навантаженнями (або сукупністю навантажень), які характеризуються постійною зміною потужності (наприклад дугові електропечі, зварювальні машини).

Перебої напруги, що відбуваються систематично або випадковим чином (інтервали між вищими перебоями в кілька секунд). Ці коливання викликані включенням значних навантажень (наприклад: пуск двигуна, робота батареї конденсаторів).

Математичне пояснення походження флікера:

Джерела цих коливань - електричне обладнання, функціонування якого вимагає циклічних змін струму, які, проходячи по повного опору мережі (R , X), викликають коливання напруги U (рис 22).

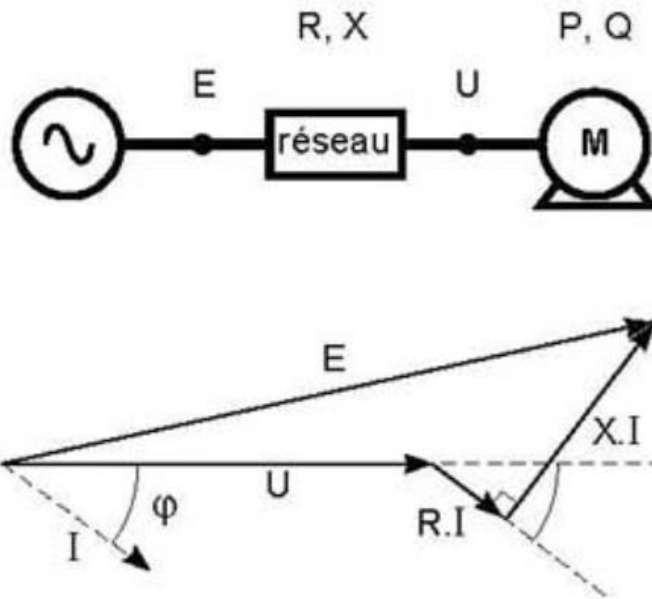


Рисунок 22 - Коливання напруги викликають флікер, струм I проходить по повного опору мережі (R, X)

Визначаємо:

U = номінальну напругу мережі

E = напругу холостого ходу мережі

$\Delta U(t)$ = Падіння напруги ($= E - U$)

P = активна потужність навантаження під номінальною напругою U

Q = реактивна потужність навантаження під номінальною напругою U

$\cos \varphi$ = коефіцієнт потужності навантаження

I = номінальний струм навантаження

S_{cc} = потужність короткого замикання

R = загальне активний опір

X = загальне реактивне опір

Якщо вважаємо, що кут між E і U малий:

$$\Delta U(t) = E - U \approx RI \cos \varphi + XI \sin \varphi, (10)$$

Чи можна записати:

$$P = UI \cos \varphi \quad Q = UI \sin \varphi, (11)$$

що дає:

$$\Delta U(t) = (RP + X \cdot QU) / U, (12)$$

і у відносних одиницях:

$$\Delta U(t) = (RP + X \cdot QU) / U^2, (13)$$

Зауваження:

1) - при ВН опір R незначно проти повного опору X, рівняння набуде вигляду:

$$\Delta U(t) = U \approx XQ/U^2 = Q/Scs, (14)$$

саме зміна реактивної потужності Q переважає і, отже, має контролюватися;

2) - при НН R не є незначним: треба враховувати активну і реактивну потужності P і Q.

Коливання напруги зазвичай не впливають на правильну роботу приєднаних пристроїв, коливання, що є нижчими за встановлені межі коливання напруги харчування. Навпаки, ці коливання можуть, для різних типів освітлення, впливати на потік світла.

Всі джерела світла чутливі до коливань напруги, представимо їх у порядку спадання чутливості:

- лампи денного світла ртутні або натрієві, вони висвітлюють місця, де мелькання мало заважає (зовнішні простору, пам'ятники, дороги, і т.д.);

- лампи розжарювання;

- лампи денного світла.

Телевізори так само, як екрани комп'ютерів, мають деяку чутливість до флікер, вона дуже мінлива в залежності від пристрою, ніякого точного вивчення не було проведено з цього приводу.

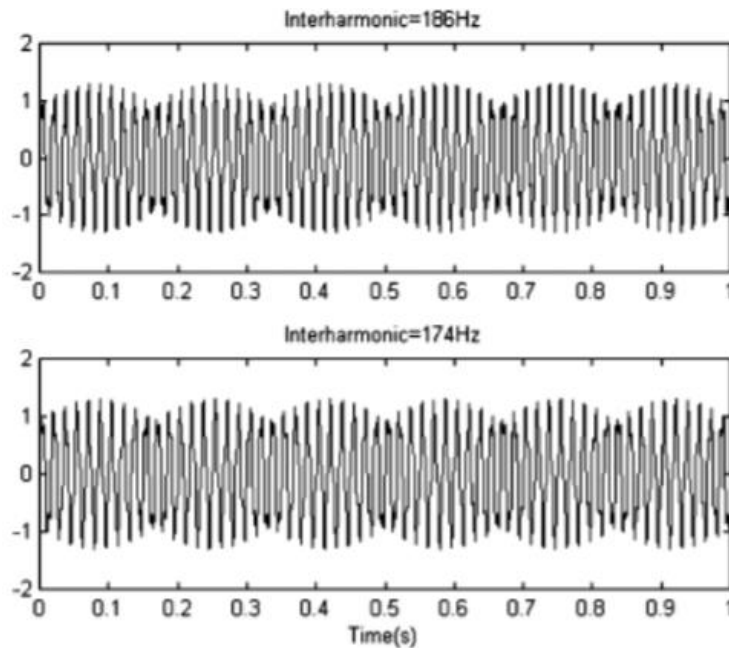


Рисунок 23 - Ефект флікеру спричинений інтергармоніками

Якщо в форму хвилі напруги вводиться інтергармоніка, величина комбінованої форми хвилі може коливатися, і внаслідок цього може виникнути мерехтіння. На (рис. 23) показана форма хвилі з інтергармонікою 117Гц, накладеною на форму хвилі 60Гц. Величина інтергармонічної складової становить 50%. Видно, що огинаюча форми хвилі помітна коливання.

1.2.6 Міжнародні стандарти вимірювання інтергармонік

IEEE Інтергармонійна цільова група - активна дослідницька організація по інтергармонікам. Серія їхніх робочих документів були опубліковані і рекомендовані для включення інтергармонік до стандарту IEEE 519. В основному вони приймають стандарт ІЕС для визначення, виміру і обмеження інтергармонік.

У ІЕС 61000-4-7 дозволили стандартизувати 5Гц для виміру інтергармонік, інтергармонічних груп. Групи або підгрупи гармонік і інтергармонік визначаються для звіту про виміри. Підгрупу рекомендується використовувати, якщо мова йде про інтергармоніки. Гармонійна підгрупа включає в себе один елемент дозволу по гармоніці і два елемента, що примикають до центральної гармоніки. Наприклад, (175, 180, 185 Гц) - це 3-тя гармонійна група. Всі інші інтервали між двома сусідніми

гармонійними підгрупами утворюють інтергармонічну групу. Наприклад, (130, 135, . . ., 165, 170 Гц) - інтергармонічна підгрупа між 2 і 3-ої гармоніками. Це поняття, очевидно, має намір розкрити проблема витоку. Треба брати до уваги деякі обмеження цього стандарту. По-перше, інтегрармонічні частоти не можуть бути точно знайденими в рамках цієї структури. У цьому стандарті центральна частота інтергармонічної групи визначається як групова частота, немає точної інтергармонічної інформації про частоту доступну для її вимірювання.

Визначена частота групи може бути далекою від фактичної складової, коли розташована інтергармоніка близька до фундаментальної або певної гармоніки. По-друге і що ще важливіше, ті інтергармоніки які близькі до них фундаментальні чи гармонічні не вдалося виявити належним чином. Ці інтергармоніки, близькі до гармонічних або фундаментальних викликають значне мерехтіння. Тому дуже бажано виявлення цих проміжних гармонік для усунення проблем з мерехтінням. Але оскільки стандарт включає елементи дискретизації, суміжні з гармонікою, в підгрупу гармонік, можливість виявлення флікера, що викликає інтергармонік, буде значно зменшена. Дозвіл 5 Гц ще більше погіршує ідентифікацію інтергармонік.

1.2.7 Проблеми при визначенні інтергармонік

Електротехнічні пристрої генерують у мережу перешкоди, 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.

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.

1.3 Пошук та вплив коефіцієнту спотворення згідно ІЕС 61000-4-7

Стандарт ІЕС 61000-4-7 є міжнародним стандартом, який описує як розрахувати і представити інтергармоніку. Це лише одна частина стандарту ІЕС 61000 з електромагнітної сумісності. Для системи 50Гц, що виконує ДПФ з використанням вікна 10 періодів, тобто 200мс (в результаті чого з роздільною здатністю частоти 5Гц), стандарт ІЕС 61000-4-7 визначає інтергармонійні групи для струму відповідно до (форм. 15):

$$I_{G,h} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot I_{RMS,C,(10 \cdot h)-5}^2 + \sum_{k=-4}^y I_{RMS,C,(10 \cdot h)+k}^2 + \frac{1}{2} \cdot I_{RMS,C,(10 \cdot h)+5}^2}, \quad (15)$$

де підрядковий індекс G означає "група", підрядковий індекс h - гармонійний порядок, підрядковий C - означає "компонент", а $I_{RMS,C,(10 \cdot h)+k}$ - СКЗ компонента в частотному діапазоні число $(10 \cdot h) + k$. . Відповідний індекс для напруги визначається як $V_{G,h}$. Авторський інтерпретація полягає в тому, що для основної частоти тільки ліва частина відповідає 50Гц, тобто №10. Для другої гармоніки слід використовувати тільки проміжні компоненти праворуч від нього. Це зображено на (рис. 24).

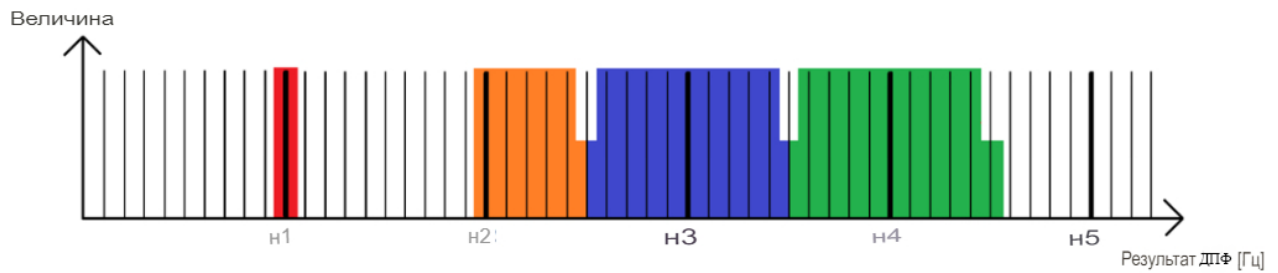


Рисунок 24 - Гармонійні групи згідно IEC 61000-4-7

Використовуючи вищенаведене визначення інтергармонійних груп, загальне інтергармонійне спотворення групи для струму визначається відповідно за (форм. 16):

$$THDG_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{40} \left(\frac{I_{G,h}}{I_{G,1}} \right)^2}, \quad (16)$$

де відповідний показник напруги заданий $THDG_V$.

Існують очевидні обмеження в схемі групування. Наприклад, низька частота роздільної здатності 5Гц в (ДПФ) значно обмежить можливість точного виявлення частоти потенційних інтергармонік. Коли групування було зроблено інтервал 25Гц в кожному напрямку гармоніки буде представлено одним єдиним значенням, що робить виявлення окремих інтергармонічних частот в основному неможливим.

Висновки до розділу

Розділ включає визначення та основні поняття про інтергармоніки. Описано сучасні та основні методи які допоможуть визначити інтергармоніки. Розглянуто ефект флікеру появи якому сприяють інтергармоніки також міжнародні стандарти визначення інтергармонік і проблеми при їх визначенні. Також більш детально розглянуто стандарт IEC 61000-4-7.

РОЗДІЛ 2 - ВПЛИВ МЕТОДОЛОГІЇ ВИМІРЮВАНЬ ІНТЕРГАРМОНІКИ НА ТОЧНІСТЬ АНАЛІЗУ СПОТВОРЕННЯ ФОРМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ

Спотворені сигнали - це сигнали з несинусоїдальною формою залежності від часу. Щодо електричної напруги та струму спотворені форми сигналу є результатом використання нелінійні електричні енергетичні навантаження. Поки вони не будуть в другорядній групі серед електричних енергетичних навантажень, їх робота має мало впливу. Однак їх кількість постійно зростає, а це в свою чергу впливає на форму напруги і форми струму. Отже питання вимірювань спотворених сигналів і аналіз сигналів стає все більше значний.

При нарузі дуже часто залучаються періодичні сигнали і форми струму які спотворюються в результаті нелінійності машинальної роботи. Однак коли спотворення форми сигналу є результат роботи електричних комутаційних компонентів сигнали дуже часто бувають нестійкими і мають складову частоту від кількох сотень Гц до кількох десятків кГц, які не синхронізовані з мережею. Цей тип сигналу нелегко виміряти та аналізувати, оскільки він містить як гармоніки, так і інтергармоніки при тому вони ще й змінюють повільні компоненти та ті що швидко змінюються, і що ще гірше вони додатково змінюватися з часом. Така форма сигналу викликає дві проблеми:

- мінімальна кількість зразків, що гарантує відображення швидкозмінних і повільно змінних компонентів включених у спотворення, може бути дуже високим,
- основна частота Фур'є не може бути визначена тому що частота всіх компонентів невідома.

Сучасні аналізатори якості електроенергії мають достатньо пам'яті і здатні робити вибірку з такими високими частотами, що проблема згадана як перша, може сприйматися як обтяжлива через збільшення витрат на вимірювання та обчислення. Друга проблема, що стосується інтергармонік, не дозволяє знайти точну фундаментальну частоту Фур'є. Однак існує багато (параметричних і непараметричних) методів для оцінки цифрових параметрів фундаментальних

компонентів, що дозволяє визначити його частоту з прийнятною точністю. Найчастіше використовують методи спектрального аналізу.

Стандарти ІЕС 61000-4-30 і ІЕС 61000-4-7 є документи, що визначають методи дослідження та вимірювання якості електроенергії включаючи спотворення струму і напруги.

Аналіз представлений у цьому розділі порівнює значення для різних частот виходу a інвертора частоти. Аналіз проводилися на основі вимірювання, що відповідає нормам і виконаний в режимі цикл за циклом.

2.1 Стандартизація вимірювання

Методика вимірювань та вимоги до приладів які використовувалися в тестуванні якості електроенергії включаючи струм і напругу спотворення були дотримані до норм ІЕС 61000-4-30 та ІЕС 61000-4-7. Є багато досліджень які роз'яснюють рекомендації чи пропозиції, пов'язані з аналізом спотвореного сигналу, включених до норм.

Відповідно до рекомендацій норм частотний аналіз сигналів повинен включати 50 гармонік, визначених методом ДПФ. Ширина часове вікно аналізу ДПФ визначається як 200мс (10-періодні 50 Гц), а роздільна здатність по частоті 5 Гц. Норма рекомендує провести усереднення вибраних значень у дуже короткий (3с), короткий (10хв) і довгий (2год) час вимірювання. Необхідно провести базове вимірювання інтергармонік для 10-періодних центрованих підгруп, що не перекривають вищезгадані інтергармоніки.

Щоб визначити кількісне спотворення форми сигналу стандарт ІЕС 61000-4-7 вводить концепцію групування. Це говорить, що спектр з частотою 5Гц отриманий як результат ДПФ підлягає групуванню. Норма визначає:

- групу гармонік,
- підгрупа гармонік,
- група з інтергармонік і підгрупа інтергармонік.

Припущено за позначеннями норм:

$Y_{g,h}$ - ефективне значення групи h гармоніки,

$Y_{sg,h}$ - ефективне значення підгрупи h гармоніки,

$Y_{ig,h}$ - ефективне значення групи інтергармонік, які є h і $(h+1)$ гармонік,

$Y_{C,(N \cdot h)+k}$ - ефективне значення спектральної складової, що відповідає початковому ДПФ $(N \cdot h)+k$,

N - кількість періодів основної гармоніки в вікні вимірювання.

За цими припущеннями можна визначити групи та підгрупи:

А) Відповідно до норми значення групи h , гармоніка визначається на основі h гармоніки і з десяти сусідніх інтергармонік. Проте лише 8 найближчих і половина значень найдаальших сусідів зображено на (рис.25.):

$$Y_{g,h}^2 = \sum_{k=(N/2-1)}^{(N/2)-1} Y_{C,(N \cdot h)+k}^2 + \frac{Y_{C,(N \cdot h)-N/2}^2 + Y_{C,(N \cdot h)+N/2}^2}{2}, \quad (17)$$

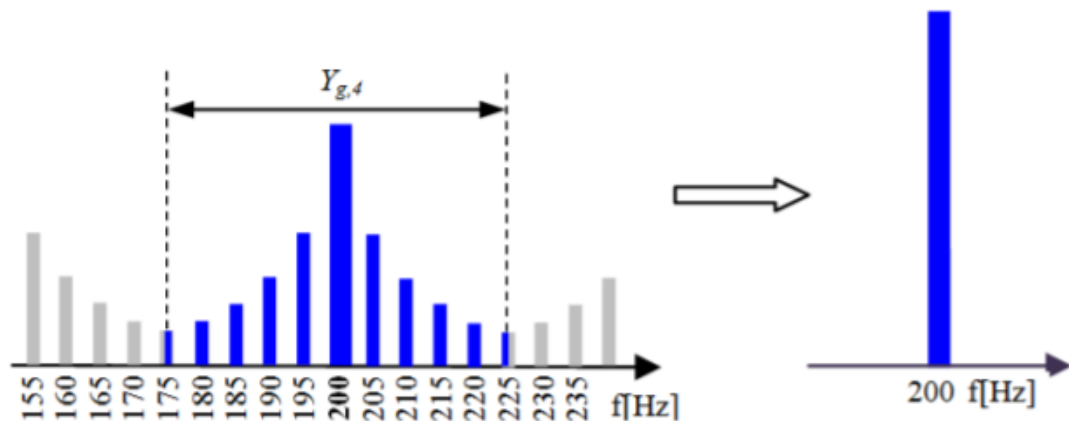


Рисунок 25 - Створення гармонійної групи

Б) Визначено значення підгрупи h гармоніки на основі h гармоніки і двох сусідніх інтергармоніки зображено на (рис. 26):

$$Y_{g,h}^2 = \sum_{k=-1}^I Y_{C,(N \cdot h)+k}^2, \quad (18)$$

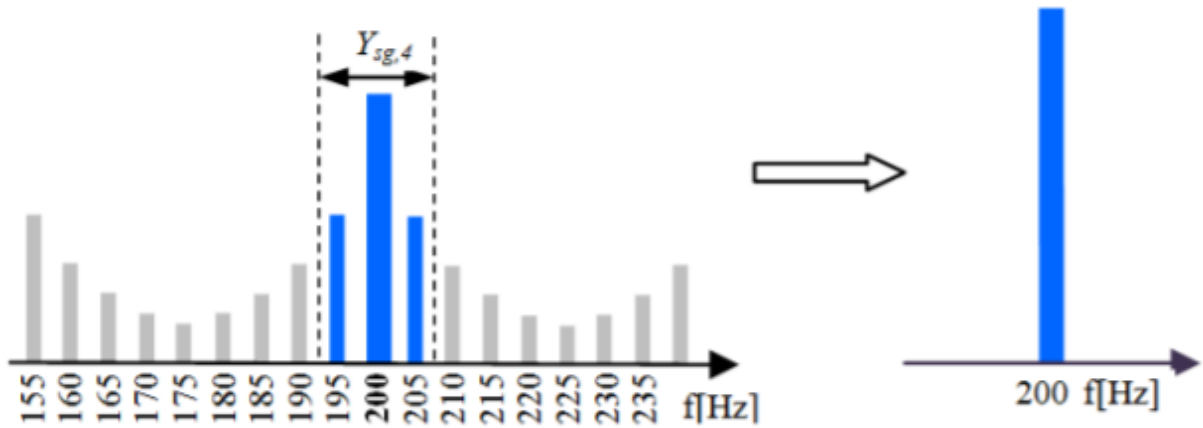


Рисунок 26 - Створення гармонічної підгрупи

В) Для того щоб визначити групу інтергармонік, які є між h і $(h+1)$, всі стовпці перетворення що між гармоніками слід включити як це зображено на(рис. 27):

$$Y_{ig,h}^2 = \sum_{k=1}^{N-I} Y_{C,(N \cdot h)+k}^2, \quad (19)$$

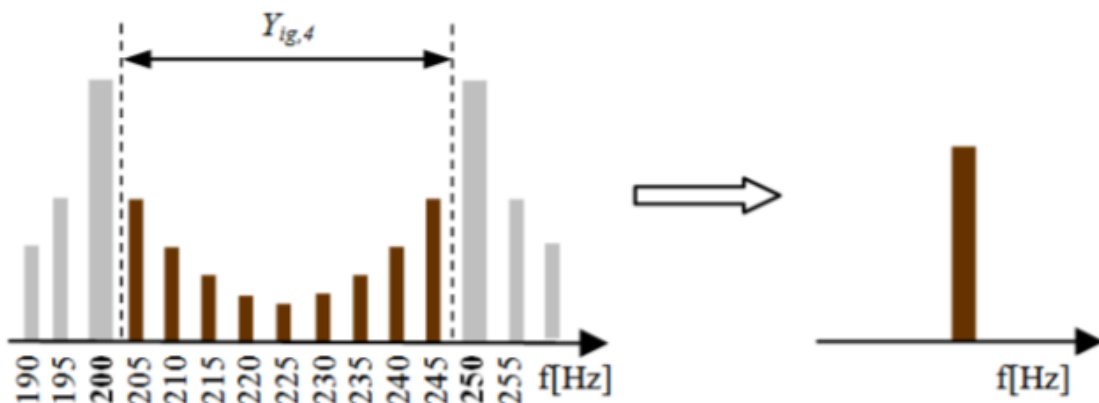


Рисунок 27 - Створення інтергармонійної групи

Г) Для того, щоб визначити значення інтергармонічної групи, компоненти які є прямими сусідами з частотами гармонік слід виключити із залежності, як зображено на (рис. 28):

$$Y_{isg,h}^2 = \sum_{k=2}^{N-2} Y_{C,(N \cdot h)+k}^2, \quad (20)$$

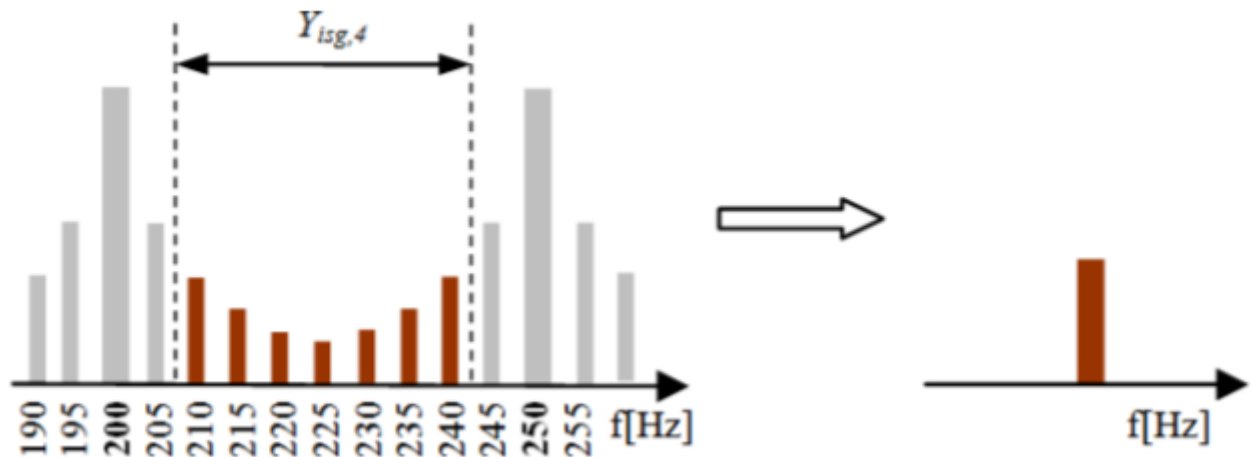


Рисунок 28 - Створення інтерармонійної підгрупи

2.2. Оцінка спотворення форми сигналу

Для оцінки спотворення періодичної форми сигналу необхідно визначити показники, які дозволили б зробити оцінку більш об'єктивною відповідно до прийнятих критеріїв. Аналіз спотворень дуже часто починається з аналізу спектру, що проводиться на основі ДПФ. Згідно з ДПФ аналізована форма хвилі $y(t)$ з періодом T повинна відповідати наступним вимогам:

- бути абсолютно інтегрованим:

$$\int_0^T |y(t)| dt < \infty, (21)$$

- мати кінцеве число локальних змінних протягом одного періоду,
- мати кінцеве число точок розриву першого роду протягом одного періоду.

Для правильного проведення ДПФ необхідно вибрати відповідний період вибірки і визначити період основної складової (мінімальної ширини вікна вимірювання). Ширина вікна вимірювання повинна бути абсолютною кратністю періоду аналізованої форми хвилі і від точності її визначення залежить точність перетворення. Це непросте завдання, оскільки мова йде про спотворені форми сигналів які мають як гармоніки так і інтергармоніки. Актуальність цього питання знайшла відображення в багатьох роботах і багато алгоритмів були створені для того, щоб точно оцінити період форми хвилі. Нестабільна частота у формі хвилі робить

неможливим точне визначення основної частоти. В результаті повне перетворення ДПФ не є точним. Однак, незважаючи на свої недоліки і недосконалості, а також незважаючи на те, що існує безліч інших методів, ДПФ все ще є найбільш часто застосовуваним методом аналізу спотворених сигналів. Це є результатом його простоти і легкості реалізації.

2.3 Фактори спотворення сигналів

Для оцінки спотворення форми сигналу можуть використовуватися різні індекси, що несуть різну інформацію. Я в свою чергу спрямовую зусилля на з'ясування того, чи впливає методологія вимірювання на їх результати і як. Таким чином, були обрані найбільш популярні показники, що використовуються для оцінки спотворення форми сигналу. Індекси що використовуються порівнюються нижче:

А) Ефективне значення

Представлено ефективне значення періодичної форми сигналу із залежністю:

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f^2(t) dt} = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} X_k^2} \approx \sqrt{\sum_{k=1}^N X_k^2}, \quad (22)$$

У разі струму ефективне значення описується значенням постійного струму, який протікає через ідеальний опір, будучи весь час кратним періоду, викликає вивільнення енергії такої ж як одночасно протікає змінний струм.

Б) Коефіцієнт вмісту k гармоніки

Коефіцієнт вмісту гармонік визначає внесок окремих компонентів у форму сигналу:

$$w_k = \frac{x_{(k)}}{x_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (23)$$

В) k коефіцієнт інтергармонічного змісту

Коефіцієнт інтергармонічного змісту визначає внесок конкретних інтергармонік в форму сигналу:

$$w_k = \frac{v_{(k)}}{v_{(1)}} \cdot 100\%, \quad (24)$$

Г) Повне гармонійне спотворення

Коефіцієнт ПГС відображає відношення ефективного значення вищої гармоніки до ефективного значення фундаментального компонента:

$$\text{ПГС} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N X_k^2}}{X_{(1)}}, (25)$$

Існують також визначення, які визначають коефіцієнт ПГС як відношення ефективного значення вищої гармоніки до ефективного значення сигналу. У роботі показано що коефіцієнт який визначається залежністю є більш корисним і однозначний. Більшість аналізаторів потужності встановлюють значення коефіцієнта ПГС, використовуючи цю залежність і аналізатор який використовується для дослідження описано нижче.

Д) Пік фактор

Пік фактор використовується для визначення ступеня спотворення форми хвилі і визначається як відношення значення піку до ефективного значення:

$$CF = \frac{\max |f(t)|}{X_{RMS}}, (26)$$

де: $f(t)$ - форма сигналу за часом,

$X_{(k)}$ - k гармоніка спектра сигналу,

$V_{(k)}$ - k інтергармоніка спектру сигналу,

$Ч_{RMS}$ - ефективна вартість.

Щоб отримати точну оцінку спотворення форми електричного сигналу, компоненти спотворення повинні бути репрезентативними і невід'ємними від реальності. Автори численних робіт вважають, що причиною розбіжностей може бути обмеження спектру до 50 компонентів. В напрузі крім основної складової, є домінуючі компоненти з частотою вище 25000Гц. У цьому випадку аналіз форми хвилі спотворення вимагає вказівки гармонік з частотами, перевищують частоту 50 гармонік. Складова ПГС, після розширення діапазону розглянутих гармонік, збільшується з 1,51% до 7,9 %. В інших роботах, що містять аналогічні питання, стверджувалося що для моніторингу спотворення форми електричних сигналів на

судні доцільно застосовувати компоненти ПГС, які включають компоненти з частотами до 10кГц.

Вплив кількості гармонік на величину складовою також представлено у роботі. Можна помітити що значення компонента, розраховане на частоту що перевищує частоту перемикачання напівпровідникових елементів перетворювача відрізняється від значення отриманого відповідно до стандартів ІЕС. Ось чому інші автори стверджують що повне гармонійне спотворення має бути розраховано до гармонік що перевищують частоту перемикача перетворювача і не обмежують експеримент тільки 50 компонентами.

Навпаки в їхніх роботах було представлено порівняння вихідного сигналу з сигналом отриманим на основі спектру визначеного відповідно до норми - різниця між відтвореним сигналом і вихідним сигналом була значною. Ймовірно, це було викликано, серед іншого зменшенням діапазону аналізованого спектру відповідно до норми. Подальші дослідження показали що звуження спектра гармонік може вплинути на інші параметри такі як електричні сигнали та ефективне значення RMS, коефіцієнт спотворення форми хвилі ПГС і коефіцієнт амплітуди.

2.4 Випробувальна станція

Дослідження проводилися на добре підготовленому вимірювальному стенді, який складався з наступних елементів: Emerson Commander перетворювач частоти SK, асинхронний двигун Temal 3sg90l4-IE2 потужністю 1,5 кВт, серводвигун Delta ЕСМА-Е21315GS потужністю 1,5 кВт, аналізатор якості електроенергії Elspec Blackbox G4500. Сервер бази даних MS SQL, мікрокомп'ютер з програмним забезпеченням PQSCADA і Pcinvestigator призначений для чорного ящика, Elspec Аналізатор G4500.

Під час роботи перетворювач частоти живить асинхронний двигун. Це дозволяє регулювати частоту його обертання. Двигун навантажений серводвигуном, встановленим на тій же станині. Аналізатор класу Elspec Blackbox G4500 відповідає за вимірювання. Він має 11 вимірювальних каналів, які дозволяють одночасно вимірювати напругу і струм в кожній фазі. Частота дискретизації напруги дозволяє

аналізувати до 511 гармонійних складових, а в разі струму-до 127 складових. Крім того, пристрій дозволяє аналізувати інтергармоніки. Аналізатор дозволяє одночасно запис даних про якість електроенергії відповідно до норми ІЕС 61000-4-30 і в режимі цикл за циклом. Це можливо завдяки двом одночасно працюючим перетворювальним двигунам, реалізує БПФ кожного циклу як для методів, так і для всіх канал.

Програмне забезпечення PQScada дозволяє відправляти дані вимірювань з аналізатора на сервер MS-SQL. Правильно налаштована програма Pcinvestigator отримує дані з сервера MS-SQL і дозволяє проводити аналіз і їх візуалізацію.

2.5 Результати

Вимірювання проводилося на випробувальній станції, як описано у попередньому розділ. Значення факторів для різних частот фундаментальний компонент, що задає різні значення частота напруги електродвигуна (38,1Гц; 42,5Гц; 45,8Гц; 49,7Гц; 53,7Гц; 57,6Гц; 61,6Гц) та за допомогою здатності аналізатора до одночасного запису даних у циклі за режим циклу (СрС). Відповідно до норми ІЕС 61000-4-30, значення факторів, зазначених у пункті (2.3), були порівняні для різних частот основного компоненту.

На (рис. 29). показані проаналізовані форми сигналів напруги, які мають великі спотворення. Таке порівняння показує, що зниження частоти напруги нижче 50Гц (45,8 Гц, 42,5 Гц) викликає все більш нечітку форму сигналу. Це не відбувається при підвищенні частоти вище 50Гц.

Форма сигналу напруги на (рис. 29.) вказує на те, що він складається з багатьох компонентів. Таким чином, слід очікувати широкого спектру гармонік і, можливо, інтергармонік. На (рис. 30.) представлений спектр початкової напруги для різних частот, пов'язаних з основною складовою, і спектр інтергармонік, виражений в Вольтах. Спектри показані в першому стовпці ІЕС на (рис. 30) були зареєстровані відповідно до норми ІЕС 61000-4-30. Їх спостереження призводить до висновку, що спотворення форми сигналу напруги викликані в основному третьою гармонікою.

Цей висновок помилковий, так як в повному спектрі гармонік можна спостерігати великий внесок вищих складових (друга колонка рис. 30). У випадку частот нижче

50Гц з'являється кілька груп дуже високих гармонік. Це виправдовує нечіткі тимчасові форми сигналів саме для цих частот. Аналіз інтергармонік (третій стовпець рис. 30) показує, що вони впливають на форму сигналів, але вона безумовно більше для частот вище 50Гц.

Коефіцієнт нелінійних спотворень є другорядним значенням у відношенні змісту окремих гармонік, однак він відображає глобальний вплив вищих гармонік на форму сигналів.

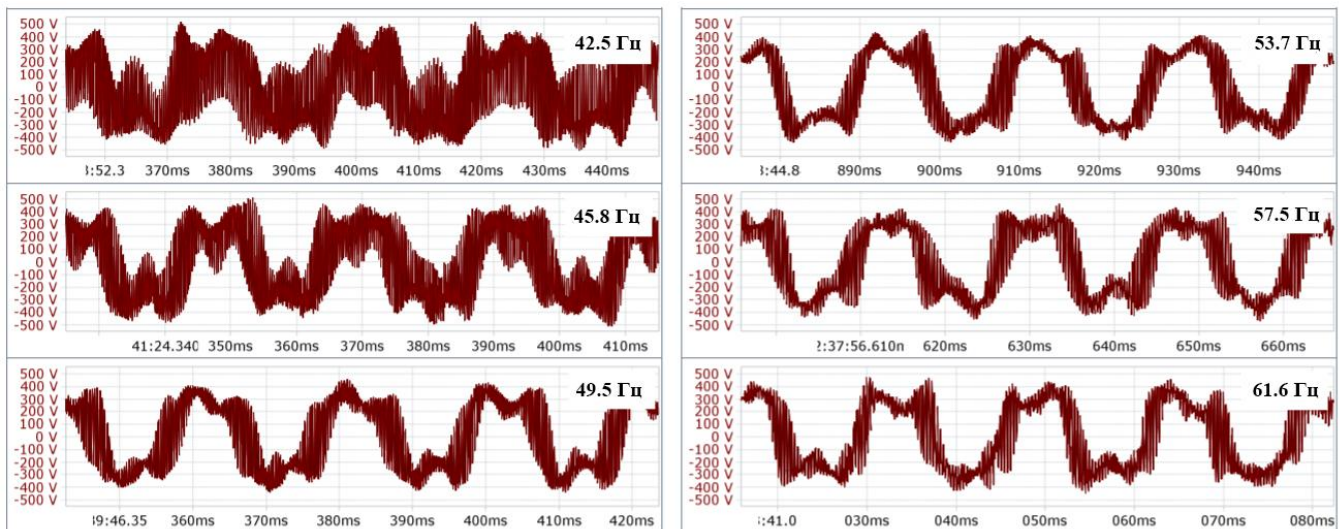


Рисунок 29 - Форми сигналів напруги для різних частот живлення

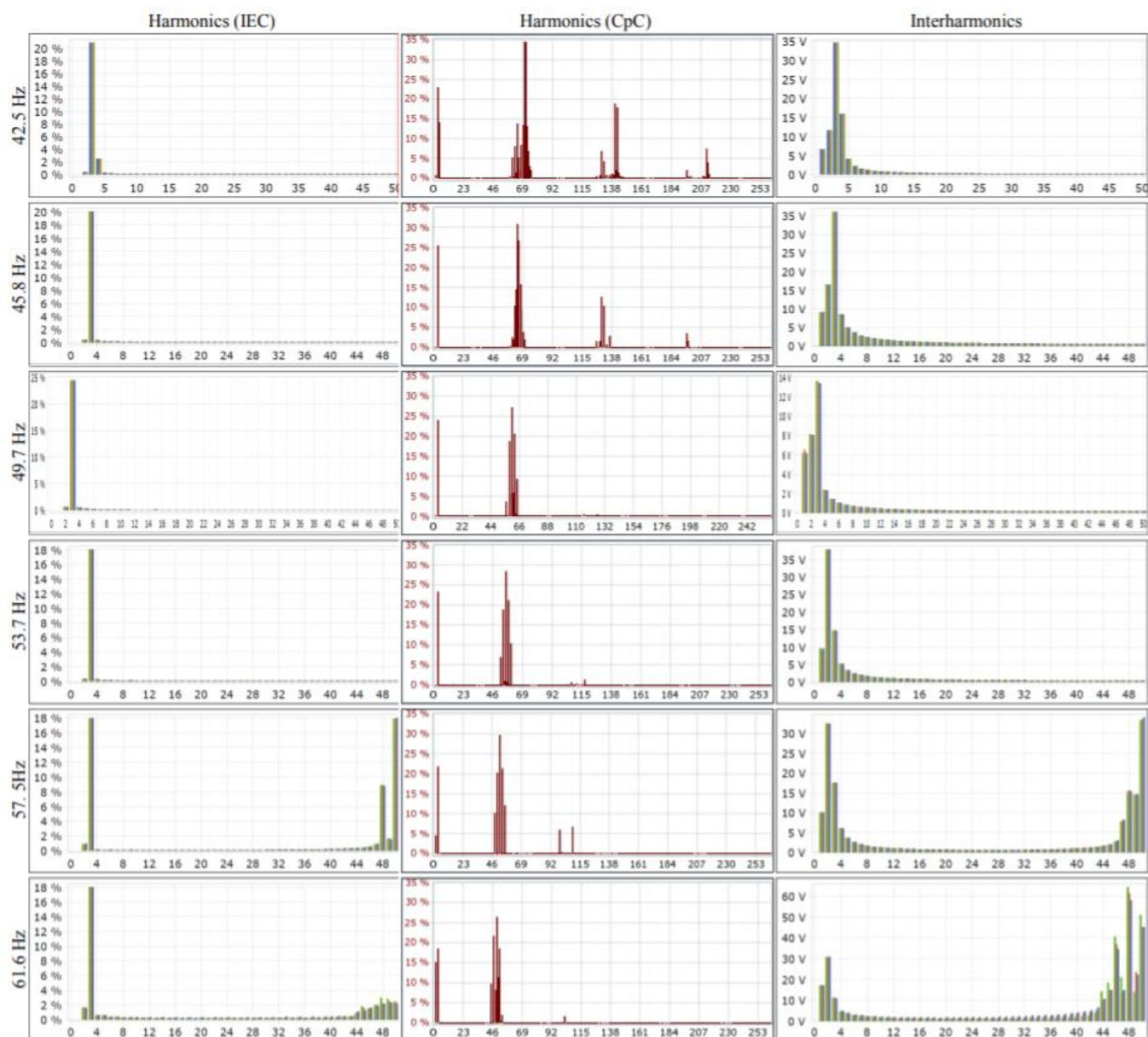


Рисунок 30 - Спектри гармонік і інтергармонік записані для різних частот напруги під час вимірювань в режимі "цикл за цикл" (CpC) і відповідно до загальних норми

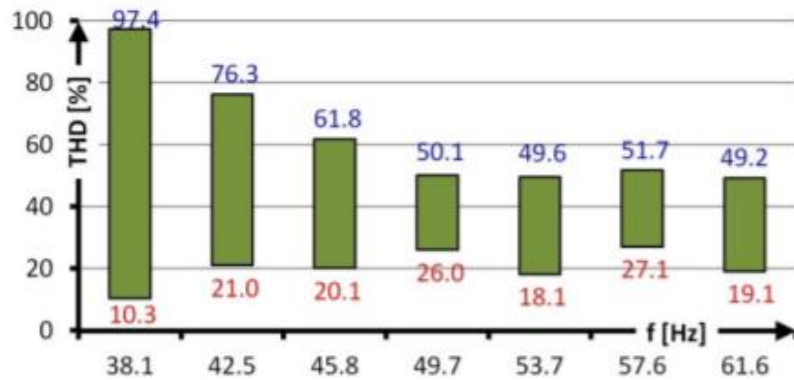


Рисунок 31. Відмінності між середніми значеннями THD, зареєстрованими при вимірах в режимі цикл за цикл (CrC) і відповідно з нормом

На (рис. 31) і (рис. 35) зображено залежність між вимірами ІЕС 61000-4-30, що вказує на значно нижче значення результатів коефіцієнта і передбачуваної методології. Вимірювання проведені відповідно до рекомендацій Стандарт ІЕС 61000-4-30, показує значно менше значення коефіцієнта ПГС, ніж вимірювання, що виконуються цикл за циклом. Аналізуючи співвідношення з стандарту ІЕС 61000-4-30 і ті що зображені на (рис. 31) легко помітити, що це викликано тим, що у вимірах, відповідних нормі, не враховуються гармоніки вище 50. Вимірювання, проведені відповідно до рекомендації стандарту ІЕС 61000-4-30 вказують на те, що як значення, так і зміни в них невеликі, хоча вони великі відповідно до вимірювань цикл за циклом які зображені на (рис. 25).

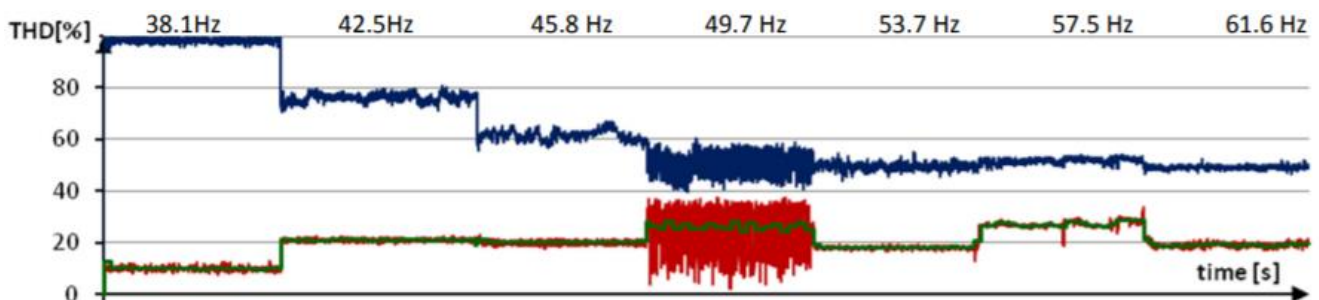


Рисунок 32 - Зміни зареєстровані для різних частот напруги під час вимірювань циклу за цикл (CrC). Темно-синя лінія-цикл за циклом, червона лінія-аналізу у вікні з 10 періодами, зелена лінія-усереднене значення за час 150 періодами.

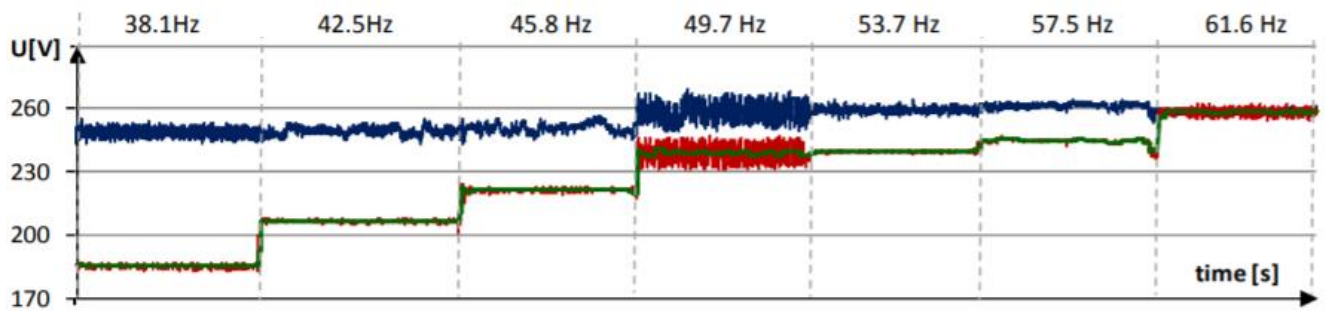


Рисунок 33 - Зміни середньоквадратичного значення, зареєстровані для різних частот напруги під час вимірювань циклу за цикл (CrC). Темно-синя лінія-цикл за циклом що включає всі компоненти, червона лінія-аналіз у вікні 10 періодів, зелена лінія-усереднене значення за час 150 періодів

Вимірювання ефективного значення напруги також показує велику розбіжність між значеннями вимірюваними цикл за циклом, і значеннями виміряними відповідно до норми ІЕС 61000-4-30 зображені на (рис. 33). Аналогічно вимірам ПГС, значення, виміряні відповідно до норми, виміряних в режимі цикл за циклом. Розбіжність між вимірами зменшується зі збільшенням частоти вимірюваної напруги зображених на (рис. 34).

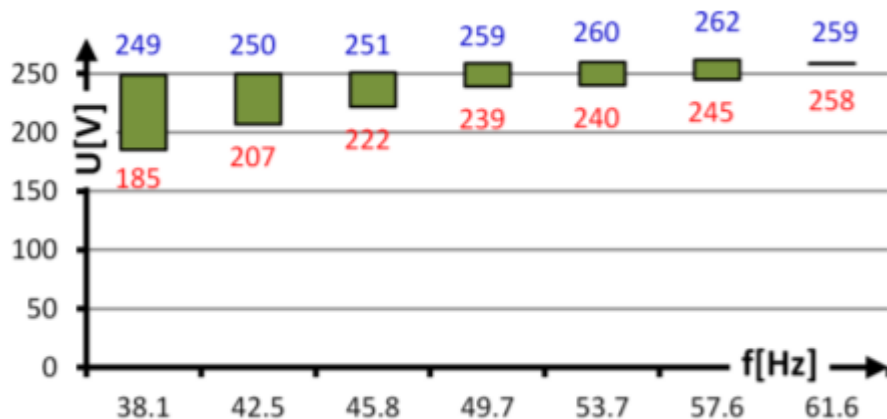


Рисунок 34 - Відмінності між середніми значеннями середньоквадратичного значення, зареєстрованого під час вимірювань за цикл(CrC)

В іншому дослідженні порівнювали значення верхнього фактора встановленого з цикл за циклом вимірювань які зображені на (рис. 35). Аналогічно як і у випадку

ПГС і RMS, встановлені значення розрізнялися. Більш того, вимірювання за певні періоди, що проводяться цикл за циклом, значно відрізнялися.

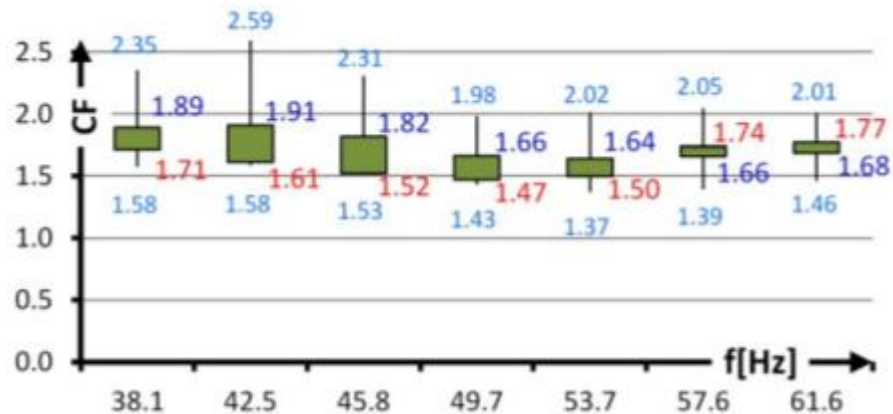


Рисунок 35 - Відмінності між середніми значеннями коефіцієнта верхнього фактора зареєстрованими протягом циклу за циклом (CpC). Синій колір описує мінімальні і максимальні значення виміряні в CpC

Висновки до розділу

Розділ включає огляд методів вимірювання спотворення форми сигналу напруги. В ньому представлені етапи вимірювання складових форми хвилі, незвичайні для класичних основ електротехніки та теорії сигналів, включаючи процес створення груп і підгруп гармонік і інтергармонік. Крім того, були представлені окремі показники спотворення спотворених сигналів.

Оцінка спотворення форми сигналу напруги і струму має вирішальне значення для аналізу якості електроенергії. Таким чином вона повинна бути однозначною і точною. Більшість пристроїв доступних на ринку, дозволяють проводити точні вимірювання і аналіз мережевої електрики.

Дослідження представлені в розділі, показали, що використання аналізаторів, що працюють відповідно до норм, для вимірювання сильно спотворених сигналів може призвести до помилок. Методологія вимірювання може призвести до помилкових результатів, викликаними обмеженнями спектра.

РОЗДІЛ 3 - РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СПОСОБУ ВИЗНАЧЕННЯ КОЕФІЦІЄНТУ СПОТВОРЕНЬ ФОРМИ ЕЛЕКТРИЧНОЇ НАПРУГИ

3.1 Основи вейвлет-аналізу

Вейвлет-перетворення широко використовується для аналізу сигналів. Крім цього, він знаходить велике застосування в області стиснення даних. Вейвлет-перетворення одновимірному сигналу - це його уявлення у вигляді узагальненого низки чи інтеграла Фур'є у системі базисних функцій.

$$\psi_{ab}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad (27)$$

Сконструйовані з основного (вихідного) вейвлету $\psi(t)$, що володіє певними властивостями за рахунок операцій зсуву в часі (b) та зміни тимчасового масштабу (a).

Множник $\frac{1}{\sqrt{a}}$ забезпечує незалежність норми на (форм. 27) від масштабуючого числа (a). Для заданих значень параметрів a і b функція $\psi_{ab}(t)$ є вейвлет, що породжується основним вейвлетом $\psi(t)$.

Між концепцією Фур'є та масштабом вейвлету існує взаємозв'язок. Головне у цьому взаємозв'язку - зворотна пропорційність власної частоти та масштабу. Крім цього, зменшуючи масштаб збільшується смуга пропускання спектра вейвлету.

За рахунок зміни масштабу (збільшення a призводить до звуження Фур'є-спектру функції $\psi_{ab}(t)$), вейвлети здатні виявляти різницю в характеристиках різних шкалах (частотах) а з допомогою зсуву проаналізувати властивості сигналу у різних точках усім досліджуваному інтервалі. Тому при аналізі нестационарних сигналів, за рахунок властивості локальності вейвлетів отримують істотну перевагу перед перетворенням Фур'є, яке дає лише глобальні відомості про частоти (масштаби) аналізованого сигналу, так як система функцій (комплексна експонента або синуси і косинуси), що використовується при цьому визначена на нескінченному інтервалі.

Головні ознаки вейвлету

Обмеженість. Квадрат норми функції може бути кінцевим:

$$\|\psi\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} |\Psi(t)|^2 dt < \infty, \quad (28)$$

Локалізація. Вейвлет-перетворення на відміну перетворення Фур'є використовує локалізовану вихідну функцію і в часі, і за частотою. Для цього достатньо, щоб виконувались умови:

$$|\psi(t)| \leq C(1 + |t|)^{-1-\varepsilon} \text{ і } |s_\psi(\omega)| \leq C(1 + |\omega|)^{-1-\varepsilon} \text{ при } \varepsilon > 0, (29)$$

Наприклад, дельта-функція $\delta(t)$ та гармонійна функція не задовольняють необхідною умовою одночасної локалізації у часовій та частотній областях.

Нульове середнє. Графік вихідної функції повинен осцилювати (бути знакозмінним) навколо нуля на осі часу і мати нульову площу:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) dt = 0, (30)$$

З цієї умови стає зрозумілим вибір назви "вейвлет" - маленька хвиля. Рівність нулю площі функції $\psi(t)$, тобто нульового моменту, призводить до того, що фур'є-перетворення $s_\psi(\omega)$ цієї функції дорівнює нулю при $\omega = 0$ і має вигляд смугового фільтра. При різних значеннях (a) це буде набір смугових фільтрів.

Часто для додатків буває необхідно, щоб як нульової, а й усі перші n моментів дорівнювали нулю:

$$\int_{-\infty}^{\infty} t^n \psi(t) dt = 0, (31)$$

Вейвлети n -го порядку дозволяють аналізувати більш тонку (високочастотну) структуру сигналу, пригнічуючи його складові, що повільно змінюються.

Автомодельність. Характерною ознакою вейвлет-перетворення є його самоподібність. Всі вейвлети конкретного сімейства $\psi_{ab}(t)$ мають таку ж кількість осциляцій, як і материнський вейвлет $\psi(t)$, оскільки отримані з нього у вигляді масштабних перетворень (a) і зсуву (b) .

Безперервне вейвлет-перетворення

Можна сконструювати базис $\psi_{ab}(t)$ за допомогою безперервних масштабних перетворень (a) та переносів (b) материнського вейвлета $\psi(t)$ з довільними значеннями базисних параметрів a та b у (форм. 27).

Тоді, за визначенням пряме (аналіз) і зворотнє (синтез) БВП сигналу $S(t)$ запишуться так:

$$W_s(a, b) = (S(t), \psi_{ab}(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (32)$$

$$S(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} W_s(a, b) \psi_{ab}(t) \frac{da db}{a^2}, \quad (33)$$

де C_ψ – нормуючий коефіцієнт,

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(\omega)|^2 |\omega|^{-1} d\omega < \infty, \quad (34)$$

де: (ω) - скалярне твір відповідних співмножників, $\psi(\omega)$ - фур'є-перетворення, вейвлета $\psi(t)$. Для ортонормованих вейвлетів $C_\psi = 1$.

З (форм. 32) випливає, що вейвлет-спектр $W_s(b, a)$ (масштабно-часовий спектр) на відміну фур'є-спектра є функцією двох аргументів: перший аргумент a (тимчасової масштаб) аналогічний періоду осциляцій, тобто обернений частоті, а другий b - аналогічний зсуву сигналу по осі часу.

Слід зазначити, що $W_s(b, a_0)$ характеризує тимчасову залежність (при $a = a_0$), тоді як залежності $W_s(a, b_0)$ можна поставити у відповідність частотну залежність (при $b = b_0$).

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

Способи представлення (візуалізації) $W_s(b, a)$ можуть бути різними. Спектр $W_s(b, a)$ є поверхнею у 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-перетворення на різних масштабах (a) та часу (b). Крім того вони зображують картини ліній локальних екстремумів цих поверхонь, так званий скелетон, який виявляє структуру сигналу, що аналізується.

3.2 Розробка способу виявлення та ідентифікації коефіцієнту спотворень якості електроенергії (форми напруги)

Нині існує цілий ряд алгоритмів аналізу форми хвилі струму і напруги. Оцінка їх ефективності передбачає визначення точності і швидкодії. Широко

використовуваним методом проведення гармонічного аналізу є ДПФ, в основі якого лежить уявлення про те, що будь-яку періодичну функцію можна представити у вигляді суми окремих гармонічних складових (синусоїд і косинусоїд з різними амплітудами, частотами) - розкладання в ряд Фур'є.

Для зменшення часу проведення ДПФ був розроблений алгоритм ШПФ. Нині алгоритм ШПФ зайняв майже монопольне положення не лише серед алгоритмів спектрального оцінювання, але і в інших областях обробки інформації. Проте алгоритми Фур'є мають декілька джерел методичних похибок, які призводять до низької точності результатів гармонічного аналізу. Головними недоліками є обмеженість частотного розділення і точності оцінки частоти окремих гармонічних компонент.

Для підвищення точності проведення ШПФ застосовується ряд додаткових математичних операцій. Так, для виключення ефекту розсіяння (у разі коли довжина вибірки сигналу не дорівнює періоду аналізованої функції) проводиться синхронізація частоти дискретизації з частотою досліджуваного сигналу, доповнення нулями початкової вибірки аналізованого сигналу, або застосування часових чи спектральних вікон. Ефективним засобом зменшення ефекту спектральних витоків також є застосування віконних функцій з інтерполяційним алгоритмом.

Проте усі ці способи не збільшують частотну роздільність. Так застосування часових або спектральних вікон дозволяє зменшити ефект розсіяння за рахунок погіршення частотного розділення (у зв'язку з нехтуванням частиною інформації про функцію, яка аналізується), а при доповненні початкової вибірки нулями збільшується вибіркковість оцінювання частот вузькосмугових спектральних піків за рахунок зменшення нерівномірності АЧХ і, відповідно, похибок, які пов'язані з її нерівномірністю.

В останній час з'явилися роботи, які спрямовані на удосконалення (модернізацію) існуючих алгоритмів (методів) визначення якісних характеристик електроспоживання загалом, і гармонійного аналізу, зокрема.

Як відомо, енергія четвертого рівня вейвлет-декомпозиції характеризує наявність гармонічних спотворень у електричній мережі. Що стосується їх ідентифікації і оцінювання, то це не так однозначно. Для виключення впливу різних факторів (шуму, короткочасних коливань) нами запропоновано енергію вейвлет-коефіцієнтів четвертого рівня вейвлет-декомпозиції порівнювати з їх пороговим значенням. Якщо вона нижча - величина гармонічних спотворень вважається незначною, в іншому випадку - вона суттєва. Відомо також, що застосування алгоритму Малла призводить до виникнення нерівномірних частотних діапазонів (на кожному рівні декомпозиції відкидається високочастотна складова сигналу – декомпозиції піддається тільки апроксимуюча частина), які не дозволяють визначати середньоквадратичні значення окремих гармонічних компонент. Тобто, для проведення гармонічного аналізу за допомогою вейвлет-перетворення необхідним є застосування пакетного вейвлет-перетворення. На відміну від застосування алгоритму Малла, при пакетному вейвлет-перетворенні декомпозиції на всіх рівнях піддаються як апроксимуючі, так і деталізуючі коефіцієнти, і, відповідно, це створює рівномірні рівневі частотні діапазони.

Як відомо, ІЕС 61000-4-7, ГОСТ Р 51317.4.7 визначають контрольно-вимірювальну апаратуру для вимірювання гармонік і інтергармонік електричних струмів і напруги в системах електропостачання. У якості методу вимірювань передбачається використання ДПФ із застосуванням часового вікна Хеннінга за умов втрати синхронізації. При цьому, тривалість часового інтервалу виміру повинна бути рівна 10-ти періодам основної частоти при прямокутному вікні зважування. Не виключаються також і інші принципи аналізу, такі як застосування банків цифрових фільтрів або вейвлет-перетворення.

Вперше застосування вейвлет-аналізу в електричних мережах було запропоновано Р. Riberio в 1994 році. На відміну від перетворення Фур'є, вейвлет-аналіз при вимірі частотно-часових змін спектральних компонент інформаційного сигналу має іншу частотно-часову роздільність. У зв'язку з цим, в даній роботі

проведений порівняльний аналіз розрахунку гармонічних компонент за допомогою ДПФ і вейвлет-аналізу.

Як відомо, для забезпечення більш точного представлення гармонік за наявності нелінійних навантажень в системі електропостачання, в групи гармонік включаються проміжні спектральні лінії. При цьому, середньоквадратичне значення гармонічної групи дорівнюватиме кореню квадратному з суми квадратів середньоквадратичних значень гармонічної складової і спектральних складових, що примикають до неї, які відповідають цій тривалості тимчасового інтервалу виміру. Тобто, для оцінки гармонік результати проведення ДПФ мають бути згруповані відповідно до наступної формули:

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{j=-4}^4 G_{k+i}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2}, \quad (35)$$

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

C_{k+i} – середньоквадратичне значення спектральної складової відповідної частотної позиції ДПФ; n – порядок гармоніки рівний $\frac{k}{n}$; k – компонент Фур'є; N – число періодів у вікні годині вимірів ($N=10$).

Підсумовування квадратів діючих значень гармонік можливе у зв'язку з тим, що момент взаємної кореляції між гармоніками дорівнює нулю.

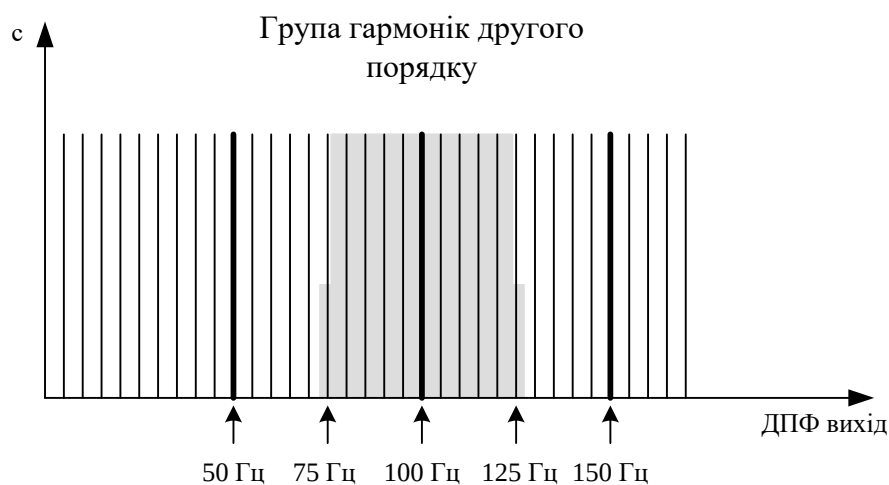


Рисунок 36 - Схема утворення гармонічної групи

Середньоквадратичне значення гармонічної підгрупи дорівнюватиме кореню квадратному з суми квадратів середньоквадратичних значень гармонійної складової і двох спектральних складових, що безпосередньо примикають до неї:

$$G_{sg,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 G_{k+i}^2, \quad (36)$$

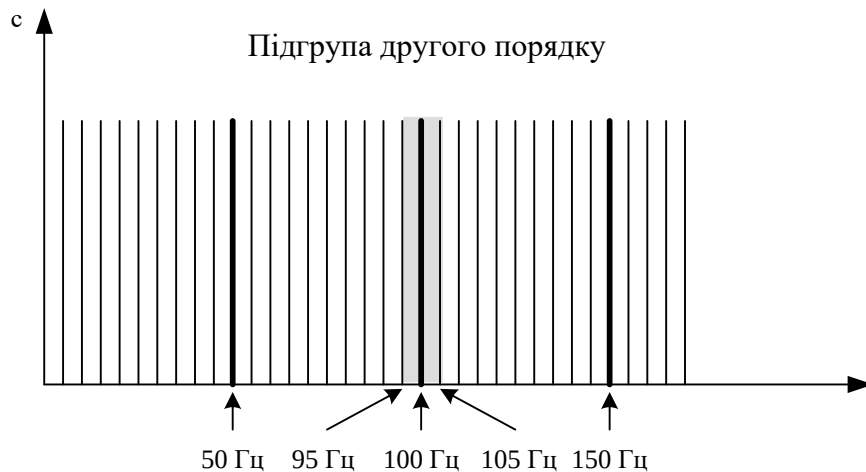


Рисунок 37 - Схема утворення підгрупи

Алгоритм визначення гармонічних груп є наступним. Як вже відзначалося, гармонійний аналіз необхідно проводити до 50 гармоніки, що при часовому вікні 200мс, частотному розділені 5Гц і необхідності виконання умов теореми Шенона (Котельникова) призводить до частоти дискретизації вхідного сигналу 6,4кГц і вейвлет-розкладання до $j=7$ рівня.

Згрупуємо вейвлет-коефіцієнти сьомого рівня розкладання на 63 групи (d_{63}^1), з кожним компонентом частоти гармоніки (як парних, так і непарних) в центрі кожної групи з інтервалом 50Гц. Визначимо середньоквадратичне значення кожної групи як корінь квадратний з середнього квадрата коефіцієнтів двох підгруп, що входять до кожної групи. Наприклад:

$$x_{\text{cpKB}}(j) = \sqrt{\sum_{p=0}^{2^J-1} \left(x_{\text{cpKB}}(j, p)\right)^2}, \quad (39)$$

У якості досліджуваного сигналу обрано наступний (рис. 38):

$x(t) = \sqrt{2}(220\sin(\omega t - 19,91^\circ) + 55\sin(3\omega t - 35^\circ) + 30\sin(5\omega t + 110^\circ) + 120\sin(7\omega t + 19^\circ))$, що має першу, третю, п'яту і сьому гармоніки. Частота дискретизації – 800Гц (0,00125с), рівень вейвлет-розкладання - $j = 4$ (16 відліків на період), часове вікно - 10 періодів.

Даний сигнал обраний за результатами аналізу наявності гармонік у електричній мережі. Так, коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги визначається: в мережах з електродуговими сталеплавильними і руднотермічними печами в основному 2, 3, 4, 5, 7 – гармоніками; установок дугового і контактного зварювання – 5, 7, 11, 13 – гармоніками; застосування газорозрядних ламп приводить до появи токів 3 та 5 гармонік (можуть складати 10 % та 3 % від струму основної гармоніки); трансформатори головної понижуючої підстанції дають 5 – ту гармоніку при несинусоїдальній напрузі на їх вводах.

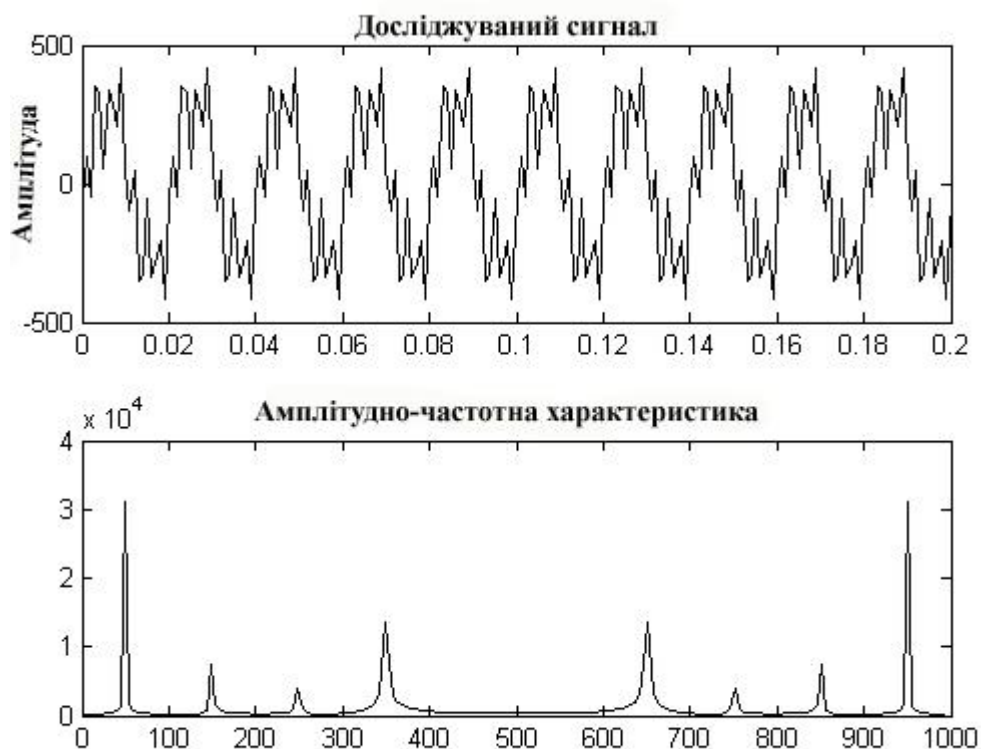


Рисунок 38 - Досліджуваний сигнал і його амплітудно-частотна характеристика

Розрахунок гармонічних груп проводився за допомогою ДПФ відповідно до і вейвлет-аналізу з різними типами вейвлетів. Результати обчислень представлені в (табл. 1).

Таблиця 1 - Порівняльний аналіз виміру гармонічних груп за ДПФ і вейвлет-перетворенням

Частотна смуга (діапазон), Гц	Гармонічна група	ДПФ	Вейвлет-аналіз			
			Добеші		'haar'	'morl'
			'db2'	'db9'		
25-75	1	220,001	220,0013	220,86	219,05	220,03
125-175	3	55,006	55,004	55,009	54,98	55,01
225-275	5	29,61	30,009	30,067	29,48	30,01
325-375	7	120,006	119,896	120,12	120,16	120,015
Сумарне значення	258,27		258,267	259,10	257,51	258,35
Помилка, %	0,015		0,016	-0,3	0,309	-0,0155

В якості вейвлет-базисів використовувалися вейвлети Добеші, Хара і Морле. Як видно із (табл. 1), результати визначення гармонічних груп за алгоритмом ДПФ і вейвлет-аналізом різняться в четвертому знаку після коми, тобто є еквівалентними. Проаналізуємо стійкість даних результатів у випадку наявності у досліджуваному сигналі (напруга електричної мережі) спотворень. Для цього в електричний сигнал $x(t)$ введемо спотворення – шумову компоненту. На (рис. 39) представлений аналізуємий сигнал

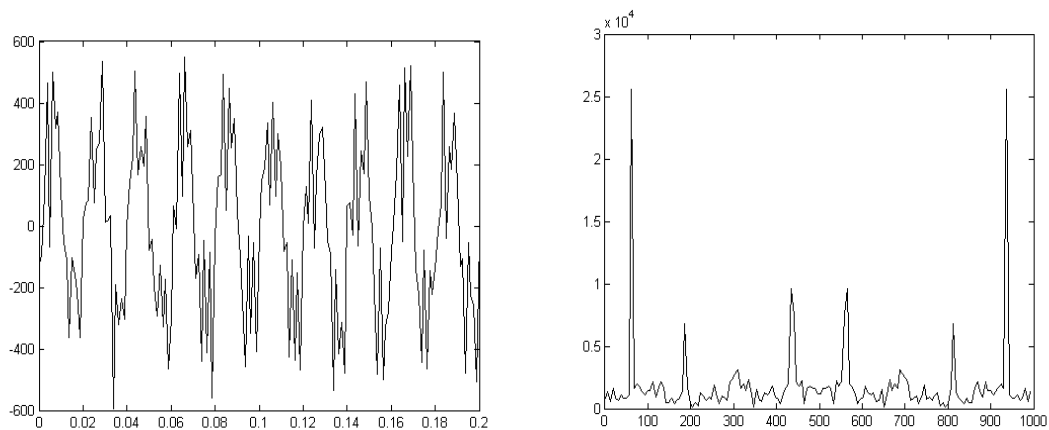


Рисунок 39 - Досліджуваний зашумлений сигнал (а) і його амплітудно-частотна характеристика (б)

Характер АЧХ (рис. 39, б), визначений за допомогою ДПФ, свідчить, що шум викликає зміни частотного образу сигналу в усьому інтервалі частот, які «розмазуються» по усій частотній осі. Отже їх виявлення за спектром стає практично неможливим. Результати розрахунку гармонічних груп зашумленого сигналу за допомогою ДПФ (без застосування віконних функцій - у зв'язку з тим, що спотворення, в основному, нестационарні, вибір необхідного вікна дуже ускладнюється) і вейвлет-аналізу зведені в (табл. 2).

Таблиця 2 - Порівняльний аналіз виміру гармонічних груп за ДПФ і вейвлет-перетворенням сигналу із шумом (рис. 39, а)

Частотний діапазон, Гц	Гармонічна група	ДПФ	Вейвлет-аналіз			
			Добеші		'haar'	'morl'
			'db2'	'db9'		
25-75	1	220,9	220,13	221,00	221,65	220,09
125-175	3	56,08	55,09	56,40	56,48	55,10
225-275	5	30,61	30,1	30,67	31,45	30,21

325-375	7	121,1	120,06	121,19	121,36	120,055
Сумарне значення	259,89		258,48	259,10	260,84	258,35
Помилка, %	-0.612		-0.0658	-0.306	-0.979	-0,058

Як показує аналіз отриманих результатів, застосування пакетного вейвлет-перетворення для гармонічного аналізу спотвореного сигналу в електричних мережах є на порядок точнішим у порівнянні з ДПФ за виключенням випадку застосування вейвлетів Haar.

Як відомо, однією із важливих проблем при визначенні якості електричної енергії являється оцінка зміни форми інформаційного сигналу (напруги або струму), яка включає спектральний та гармонічний аналіз. Сфера оцінки форми сигналу містить гармоніки, інтергармоніки, фазні кути гармонік, гармонійні симетричні компоненти та інше. Найбільш часто використовуються наступні гармонічні та інтергармонічні індекси:

- Harmonic Distortion – *HD* (гармонійні спотворення);
- Total Harmonic Distortion – *THD* (повне гармонійне спотворення);
- Total Interharmonic Distortion – *TIHD* (повне інтергармонійне спотворення);
- Total Demand Distortion – *TDD* (повне спотворення попиту для струму);
- Distortion Band Factor – *DBF* (чинник групи спотворень).

Перші три індекси спотворень знаходяться як середньоквадратичні значення гармонік та інтергармонік і, відповідно, визначені як відсоток основної частоти або оригінального спотвореного сигналу.

Відповідно до чинного ГОСТу 13109-97, індекс *THD* визначається як коефіцієнт спотворення синусоїдальності кривої напруги і розраховується наступним чином:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_2^N U_n^2}}{U_1}, (40)$$

де N - порядок найвищої гармоніки, U_n^2 – середньоквадратичне значення напруги вищих гармонік, U_1 – середньоквадратичне значення напруги основної частоти.

На даний момент THD є найбільш поширеним показником якості напруги і визначається за допомогою швидкого перетворення Фур'є. Основним недоліком визначення THD за (форм. 40) є можливість його застосування тільки для періодичних сигналів. Іншим істотним недоліком даного коефіцієнту є те, що при його визначенні не враховується індивідуальний вплив на електричну мережу і устаткування різних гармонік, а також відсутність інформації щодо фазових кутів гармонік. Це призводить до похибки визначення THD за наявності у сигналі різних гармонічних компонент у перебігу декількох періодів у межах десятків відсотків.

Похибка визначення THD для сигналу, гармонічний склад якого змінюється протягом декількох періодів, має у своєму складі інтергармоніку і для якого значення $\cos \varphi$ змінюється від 0.5 до 0.85 зсуву фаз впродовж 3-4с складає 12,86% (без урахування інтергармоніки).

Для усунення даних недоліків при визначенні показника порушення форми хвилі напруги і струму в ІЕС 61000-4-7 та у методиці визначення якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення (СОУ-Н ЕЕ 40.1 - 37471933 - 55:2011, Нормативний документ Міненерговугілля України), розроблених автором (у співавторстві), введено нові коефіцієнти. А саме:

- $THDG$ (Total Harmonic Distortion Group) – сумарний коефіцієнт гармонічних груп як відношення середньоквадратичного значення напруги гармонічних груп до середньоквадратичного значення гармонічної групи, пов'язаної з основною складовою;
- $THDS$ (Total Harmonic Distortion Subgroup) – сумарний коефіцієнт гармонічних підгруп – як відношення середньоквадратичного значення гармонічних підгруп до середньоквадратичного значення гармонічної підгрупи, пов'язаної з основною складовою.

Зважаючи на частотно-просторові властивості вейвлет-аналізу, запропоновано новий підхід до визначення коефіцієнту спотворення форми хвилі сигналу як відношення середньоквадратичних значень енергії всіх деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів до середньоквадратичного значення енергії апроксимуючих коефіцієнтів останнього рівня вейвлет-розкладання.

Наявність окремих гармонічних складових у сигналі визначається на основі аналізу значень енергії відповідних частотних суб-полос (рівнів вейвлет-розкладання). При цьому, коефіцієнт спотворення форми сигналу розраховується за наступною формулою:

$$W_1 = \frac{\sqrt{\sum_{j=1}^{J-1} \sum_{k=1}^{N_j} (cD_j(k))^2}}{\sqrt{\sum_k (cA_j(k))^2}}, \quad (41)$$

де $cD_j(k)$ і $cA_j(k)$ – деталізуючі і апроксимуючі коефіцієнти відповідно, J – останній рівень вейвлет-декомпозиції.

Результати аналізу можливості використання даного коефіцієнту довели його ефективність. Так, за наявності в аналізованому сигналі гармонік (третя, сьома, одинадцята, сімнадцята), гармонійних груп та гармонійних підгруп похибка визначення W_{THD} знаходиться у межах 0,5%, а THD - у межах 2,0%.

Що стосується такого індексу спотворення форми хвилі сигналу як $ДПФ$, то потрібно відмітити наступне. Як відомо, вейвлет-перетворення за допомогою фільтрів низької та високої частоти ділить вхідний сигнал на частотні діапазони. В зв'язку з чим пропонується у разі моніторингу якості електричної енергії спочатку визначати коефіцієнт спотворення за даними частотними діапазонами, і в разі перевищення визначеного порогового значення, проводити більш детальне визначення різноманітних індексів спотворення форми сигналу.

Висновки до розділу

1. Показано, що за наявності шумів у сигналі проведення гармонічного аналізу за допомогою вейвлет-перетворення дозволяє підвищити точність у два рази порівняно із перетворенням Фур'є.

2. Запропоновано новий підхід та спосіб до визначення коефіцієнту спотворення форми хвилі сигналу як відношення середньоквадратичних значень енергії всіх деталізуючих вейвлет-коефіцієнтів до середньоквадратичного значення енергії апроксимуючих коефіцієнтів останнього рівня вейвлет-розкладання - W_{THD} , та доведено його ефективність у порівнянні із коефіцієнтом THD . За наявності в аналізованому сигналі гармонік (третя, сьома, одинадцята, сімнадцята), гармонійних груп та гармонійних підгруп похибка визначення W_{THD} знаходиться у межах 0,5%, а THD - у межах 2,0%.

РОЗДІЛ 4 - РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП-ПРОЕКТУ

Ідея даного стартап-проекту полягає у розробленні способу визначення та вимірювання інтергармонійних підгруп в електричній мережі для їх подальшого аналізу, виявлення та усунення проблемних ділянок.

4.1 Опис ідеї методу

Таблиця 3 - Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Зменшення похибки при визначенні гармонічного складу шляхом корекції відхилення частоти	Великі та середні промислові підприємствау яких інтергармоніки викликають брак продукції	Висування претензій задля матеріальної компенсації викликаного браку інтергармоніками іншим великим промисловим підприємствам які генерують інтергармоніки. Висування претензій електропередавальним компаніям через постачання неякісної електроенергії з подальшою матеріальною компенсацією
	Електропередавальні компанії	Забезпечення високою точністю визначення інтергармонічного складу задля підтримання показників якості електричної енергії на належному рівні

4.1.1 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

Оскільки електрична енергія - це товар який не має замінників а даний метод поширюється лише на декілька показників і за певних умов (відхилення частоти) він

буде доречним то це усуває конкурентні методи. Усі інші методи визначають інтергармонічний склад без урахування відхилення частоти що автоматично усуває їх із числа конкурентів.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4 - Технологічний аудит ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Корекція девіації частоти (методологічна)	З бажаним кроком, обчислити відносну похибку і зберігати в пам'яті пристрою вимірювання	Наявна	Повністю доступні авторам оскільки метод запатентований
Корекція девіації частоти (цифровою технікою)	Вимірювати в реальному часі вхідну частоту і визначати γ . На підставі виміряного значення, визначити відносну похибку	Наявна	Повністю доступні авторам оскільки метод запатентований

Як видно із (табл. 4) запропоновано дві ідеї реалізації проекту які є абсолютно доступні авторам методу та готові до впровадження зацікавленим сторонам.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів конкурентів.

4.3.1 Аналіз попиту, наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку

Таблиця 5 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
Кількість головних гравців, од.	15160
Загальний обсяг продаж, ум.од.	100400
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Стагнує
Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Мала проінформованість споживачів про вплив відхилення частоти на точність визначення інтергармонічного складу та про вплив вищих гармонік на приймачі електричної енергії
Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Всі вимоги описані у нормативних документах описаних

Результати таблиці показали, що ринок налічує велику кількість потенційних клієнтів але їхня обізнаність у питанні залишає бажати кращого. Це і є показником прихованого попиту. Тому при правильному підході до ринку вихід з даним методом може бути привабливим.

4.3.2 Визначення потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формування орієнтованих переліків і вимог до товару для кожної групи

Таблиця 6 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Зменшення браку продукції (або його матеріальна компенсація) спричинена інтергармоніками	Великі та середні промислові підприємства у яких інтергармоніки викликають брак продукції	Уникнення споживання неякісної електроенергії	Висока точність, швидкість та простота використання
Забезпечення високого рівня ПЯЕ	Електропередавальні компанії	Уникнення претензій від споживачів щодо зниження якості ПЯЕ зазначених у ДСТУ-EN-50160	Висока точність, швидкість та простота використання

4.3.3 Аналіз ринкового середовища: складання таблиці факторів, ринкове впровадження проекту та фактори що цьому перешкоджають

Таблиця 7 - Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози та можлива реакція компанії
--------	---

Недостатня проінформованість	Не всі керівники компаній мають розуміння необхідності проведення інтергармонічного аналізу а тому малоімовірно що будуть виділяти на це кошти
Мало відомий (не розрекламований) метод	Не всі компанії звертаються за допомогою до наукових інститутів та наукових журналів задля вирішення тих чи інших питань
Низький рівень співпраці промисловості та науки	На даний час в Україні дуже слабо проглядається взаємодія між промисловими підприємствами та університетами

Таблиця 8 - Фактори можливостей

Фактор	Зміст можливості
Пілотний проект на широковідомому підприємстві	Позитивний результат застосування розробленого методу може надати необхідну рекламу іншим підприємствам
Підвищення інтересу підприємців звертатися до науковців та наукових інститутів	Успішні впровадження наукових розробок у одних підприємствах може підвищити зацікавленість у співпраці інших (нових) підприємств з науковими інститутами

4.3.4 Аналіз пропозиції: загальні риси конкуренції на ринку

Таблиця 9 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика
Тип конкуренції - монополія	Немає аналогів

За рівнем конкурентної боротьби - національний	Впровадження планується на всіх великих та середніх промислових підприємствах України
За галузевою ознакою - міжгалузева	Впровадження буде стосуватися підприємств споживачів великої кількості електричної енергії незалежно від галузі
За характером конкурентних переваг - нецінова	Перевага стосується унікальності методу

4.3.5 Детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю сил М. Портера)

Таблиця 10 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти
Складові аналізу	-	Конкуренти які створять ефективніший метод та краще популяризують його	-	Незацікавленість

Висновки:	Конкурентна боротьба відсутня	Все що необхідно для входу на ринок це хороший продукт та його ефективне просування	Оскільки автори і є постачальниками то вони можуть диктувати умови роботи на ринку	Поки клієнти не побачать вигоди від застосування методу вони не будуть замовляти послугу
-----------	-------------------------------	---	--	--

На ринку не зустрічається конкуренції по усуненню похибки визначення інтергармонічного складу при відхиленні частоти. Отже, конкуренція настане тоді коли на ринку з'явиться аналогічний метод.

4.3.6 SWOT-аналіз стартап-проекту

Таблиця 11 - SWOT аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: а) Врахування відхилення частоти (та її компенсування) при визначенні інтергармонічного складу. б) Швидкий, простий та точний метод	Слабкі сторони: а) Необхідність наявності цифрової техніки вимірювання. б) Потрібні попередні професійні знання для застосування методу.
Можливості: а) Можливість матеріальної компенсації браку спричиненого наявністю інтергармонік з подальшою вигодою для авторів методу. б) Підвищення якості моніторингу ПЯЕ.	Загрози: а) Метод не здобуде необхідної популярності. б) Імовірні клієнти не будуть вважати за необхідне проводити інтергармонічний аналіз не кажучи вже про його точність.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

4.4.1 Визначення стратегії охоплення ринку

Таблиця 12 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Всі великі та середні промислові підприємства виробництва яких ґрунтується на споживанні електричної енергії	Готовність прийняти до розгляду	Буде відомий після розгляду	Дуже низька	Проста з важкою реалізацією

Обравши цільові групи потенційних споживачів визначаємо стратегію охоплення ринку: масовий маркетинг.

Таблиця 13 - Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента та які?	Стратегія конкурентної поведінки
так	так	ні	заняття конкурентної ніші

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

4.5.1 Формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач

Таблиця 14 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
Визначати інтергармонічний склад при відхиленні частоти з невеликою похибкою	Швидкий, простий та точний метод	Метод враховує відхилення частоти при визначенні інтергармонічного складу

4.5.2 Розроблення трьох рівневої маркетингової моделі товару

Таблиця 15 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
1) Товар за задумом	Визначати інтергармонічний склад при відхиленні частоти з невеликою похибкою
2) Товар у реальному виконанні	Властивості / характеристики
	1. Швидкість 2. Простота 3. Точність
	Якість, стандарти, нормативи
	1. ДСТУ EN 50160 2. EN 61000 3. IEEE-519-1992 4. СОУ-Н ЕЕ 40.1-37471933-55_2011 та інші...
Даний метод запатентовано, тому його захищено Законом України «Про авторське право і суміжні права»	

Таблиця 16 - Формування системи збуту

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару
Купівля права користування методом	Надання права користування методом
Купівля послуги визначення інтергармонічного складу	Надання послуги по визначенню інтергармонічного складу

4.5.3 Розроблення концепції маркетингових комунікацій

Таблиця 17 - Концепція маркетингових комунікацій

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Завдання рекламного повідомлення
Купівля права користування методом	Будь які	Надання широкого спектру інформації по методу та його бенефітах
Купівля послуги визначення гармонічного складу	Будь які	Показання вигод від точного визначення інтергармонічного складу

Висновки до розділу

Даний проект має можливість комерціалізації. Але динаміка на ринку не сприяє високому попиту. Щоб покращити становище необхідно розвивати дану тематику. І тільки після успішно проведеної рекламної компанії даний метод набере необхідної популярності. Оскільки затрати на розробку методу були мінімальними то рентабельність буде максимальною.

Промисловість України потребує якісного проведення інтергармонічного аналізу, що і може забезпечити метод корекції девіації. Це відкриває широкі перспективи впровадження. Хоча сильної конкуренції не просліджується існують бар'єри які заважають успішному просуванню такі як необізнаність а як наслідок незацікавленість потенційних клієнтів.

ВИСНОВКИ

1) В даній роботі описані методи пошуку інтергармоніки та запроваджено методи за для подальшого дослідження, аналізу та впливу на коефіцієнт спотворення форми електричної споживання енергії. Запропоновані методи застосовуються як до синусоїдальної, так і до несинусоїдальної форм сигналу. Результати показують, що ці методи мають високу точність навіть з сигналами, що містять гармоніки та інтергармоніки, і для частоти, яка відхиляється від номінального значення.

2) Рівень інтергармонічного спотворення в системі, як правило, низький, оскільки в даний час в системах мало великих інтергармонічних джерел. Низький рівень інтергармонік залишає купу проблем а необхідність вимірювання або пом'якшення інтергармонік на сьогоднішній час рідкість. Методи вимірювання інтергармонік стандартизовані, але не існує обов'язкових стандартів для обмеження інтергармонік. Як би вони були, ці обмеження, ймовірно, були б подібними до існуючих меж гармоній і мерехтіння, якщо вони не були розроблені для забезпечення зв'язку по лінії електропередачі, і в цьому випадку їх, можливо, доведеться зменшити приблизно на порядок.

3) Хоча прогрес у технологіях, які підвищують гнучкість системи, збільшують рівень інтергармонік у системі, більшість обладнання енергетичної системи, яке виробляє інтергармоніки, виробляє їх на рівнях, значно нижчих за межі, визначені для гармонік. Це робить малоймовірним, що в даний час інтергармоніки викличуть проблеми, пов'язані з гармоніками в більшості систем.

4) Для належного функціонування лінії електропередачі потрібні нижчі рівні інтергармонік. Ці рівні можуть бути досягнуті шляхом фільтрації для одночастотного зв'язку, частота якого не може бути змінена, але проблеми з системами, що виробляють широкосмугові інтергармоніки, можна вирішити лише шляхом усунення інтергармонійного джерела або видалення зв'язку з ліній електропередач. Системи бездротового зв'язку використовувалися поблизу великих інтергармонічних

навантажень, таких як промислові дугові печі, щоб уникнути проблем між гармоніками.

5) Сьогодні інтергармонійні питання вирішуються в кожному конкретному випадку. Це розумно, враховуючи різноманітність та обмежену кількість інтергармонічних джерел і чутливих навантажень. Оскільки переваги та використання обладнання для генерації інтергармонік збільшуються, виробникам обладнання чутливого до інтергармонік, знадобляться рекомендації, якщо вони хочуть проектувати своє обладнання для сумісності один з одним.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Волошко, А. В. Интерполяция и повышение точности проведения гармонического и спектрального анализа / А. В. Волошко // Техническая электродинамика. – 1991. – № 3. – С. 8–14.
2. Залмазон Л. А. Преобразование Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях. – М :Наука. Гл. Руд. Физ.- мат. лит., 1989.- 496с.
3. Залмазон, Л. А. Преобразования Фурье, Уолша, Хаара и их применение в управлении, связи и других областях [Текст] / Л. А. Залмазон. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. 1989. – 496 с.
4. Волошко, А. В. Устранение влияния нестабильности частоты сети на точность определения качества электрической энергии / А. В. Волошко, О. В. Коцарь // Техническая электродинамика. –1994. – № 4. – С. 73–77.
5. ГОСТ Р 51317.4.30-2008 (МЭК 61000-4-30:2008) Електромагнітна сумісність (ЕМС) [Текст] / Частина 4-30. Методи випробувань та вимірювань. Методи вимірювання якості електричної енергії, 2008. - 59 с.
6. Куско, А. Качество электрической энергии / А. Куско, М. Томпсон. – М.: Додэка-XXI, 2008. – 336 с.
7. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. С.-Петербург, ВУС, 1999 г.
8. Сапунов М. В. Вопросы качества электроэнергии / М. В. Сапунов // Новости электротехники. - 2001. - № 5.
9. Гармонический анализ токов (напряжений) при наличии в них интергармоник и неизвестном периоде результирующего сигнала ГОЛЬДШТЕЙН Е.И., РАДАЕВ Е.В. «ЭЛЕКТРИЧЕСТВО» № 12/2009.
10. Анализ нагрева кабельных линий токами высших гармоник и интергармоник . бирюлин владимир иванович -1, куделина дарья васильевна1, горлов алексей николаевич 11 юго-западный государственный университет, г.курск, россия тип: статья в журнале - научная статья язык: русский том: 12номер: 2 (46) год: 2020

страницы: 61-67 поступила в редакцию: 20.11.2019 удк: 621.311 журнал: вестник казанского государственного энергетического университета.

11. 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.

12. Волошко А.В. Выполнение гармонического анализа с помощью вейвлет-преобразования. Электронное моделирование. 2012. Т.34 №4. С. 65-78.

13. A. Testa, D. Gallo, and R. Langella, “Interharmonic Measurements in IEC Standard Framework, ” IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, 2002, pp. 935-940.

14. Bartman, J. (2017). The analysis of output voltage distortion of inverter for frequency lower than the nominal. Journal of Electrical Engineering, 68 (3), 194-199.

15. Bollen, M., Olofsson, M., Larsson, A., Ronnberg, S., Lundmark, M. (2014). Standards for supraharmonics (2 to 150 kHz). IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, 3 (1), 114-119.

16. Binkowski, T. (2016). Influence of current sampling frequency on voltage source inverter fuzzy correction. In 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE). IEEE.

17. C. Li, W. Xu, and T. Tayjasanant, “Interharmonics: Basic Concepts and Techniques for Their Detection and Measurement, ” Electric Power Systems Research, Vol.66, 2003, pp.39-48.

18. Dahai Z. A Flicker Source identification by interharmonic power direction//Z.Dahai, W. Xu, A. Hassif//Electrical and Computer Engineering. – 2005. – P. 549 - 552.

19. D. Henderson and P. J. Rose, “Harmonics: The Effects on Power Quality and Transformers,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, 1994, pp. 528-532.

20. G. T. Heydt, Electric Power Quality, West Lafayette, IN: Stars in a Circle Publications, 1991

21. F. F. Costa, and A. J. M. Cardoso, "Harmonic and Interharmonic Identification Based on Improved Prony's Method," 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics, Nov 2006, pp. 1047-1052.

22. P. Langlois and R. Bergeron, "Interharmonic Analysis by a Frequency Interpolation Method", Proceedings of the Second International Conference on Power Quality, pp.E-26:1-7, Atlanta, US, Sep 1992.

23. IEEE Standard 519-2014. "IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," 2014.

24. IEEE Interharmonic Task Force, CIGRE 36.05/CIGRE 2 CC02 Voltage Quality Working Group, Interharmonics in Power Systems, Task Force Working Document, December 1, 1997.

25. IEEE Interharmonic Task Force, "Interharmonics in power systems," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 2, July 2001, pp. 813-817.

26. IEEE Working Group on Power System Harmonics, "Power System Harmonics: an Overview," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, Issue:8, Aug 1983, pp. 2455-2460.

27. IEC 61000-4-7:2002 Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and Measurement Techniques Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto.

28. IEC 61000-2-1:1990, "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 2: Environment - Section 1: Description of the Environment - Electromagnetic Environment for Low-Frequency Conducted Disturbances and Signalling in Public Power Supply Systems. First Edition May 31, 1990.

29. IEC Standard 61000-2-2:2002 "Electromagnetic Compatibility (ECM) Part 2-2: Environment Compatibility Levels for Low-frequency Conducted Disturbances and Signaling in Public Lowvoltage Power Supply Systems." Second Edition 2002.

30. Interharmonics: What They Are, Where They Come From and What They Do
Michael B. Marz American Transmission Company Waukesha, WI mmarz@atcllc.com

31. Khalid S. Power Quality Issues, problems, standards and their effects in Industry with corrective Means/S. Khalid, B. Dwivedi//Inter. Journal of Advances in Engineering & Technology. – 2011. –Vol. 1. – Iss. 2. – P. 1-11.
32. Khalid S. Power Quality Issues, problems, standards and their effects in Industry with corrective Means/S. Khalid, B. Dwivedi//Inter. Journal of Advances in Engineering & Technology. – 2011. –Vol. 1. – Iss. 2. – P. 1-11.
33. Mallat S. A theory for multiresolutional signal decomposition: the wavelet representation. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1989, N7, p.674-693.
34. Jiang Rongcheng, Power Quality Practice (1), Quanhua Science and Technology Book Co., Ltd., Taipei, 2000.
35. Li Fei-Fei. A Method of voltage flicker estimation based on interharmonics pairs/ Li Fei-Fei, Y. Mao-ging, Y. Hong-Geng//China Intern. Conf. on Electricity Distribution. – 2010. – 13-16 Sept. – P. 1 – 6.
36. Kamuda, K., Klepacki, D., Kuryło, K. Sabat, W. (2015). Statistical analysis of influence of the low-power nonlinear loads on deformation of supply voltage. Przegląd Elektrotechniczny, 91 (8), 19-22. (in Polish)
37. Lin, W. (2012). Current harmonics and interharmonics measurement using Recursive Group-Harmonic Current Minimizing Algorithm. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59 (2), 1184-1193
38. Hanzelka, Z., Bień, A. (2004). Harmonics. Interharmonics. Power Quality Application Guide 3.1.1., Copper Development Association.
39. Rezmer, J., Leonowicz, Z., Gono, R. (2011). Analysis of distorted waveform in power converter systems. Przegląd Elektrotechniczny, 87 (1), 254-257.
40. Tayjasanant T. Intergarmonic-Flicker Curves/ T. Tayjasanant, W. Wang, C. Li, W. Xu//IEEE Trns. On Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. - # 2. - P. 1017-1024.
41. Soltani H. Interharmonics Analysis and Mitigation in Adjustable Speed Driver: 28.02.2016 / Hamid Soltani. – Aalborg, Denmark, 2013. – 131-133 p.

42. Tayjasanant T. Intergarmonic-Flicker Curves/ T. Tayjasanant, W. Wang, C. Li, W. Xu//IEEE Trns. On Power Delivery. – 2005. – Vol. 20. - # 2. - P. 1017-1024.
43. Salov O. Electrical Power Quality of Iron and Steel Industry I Turkey/ O. Salov, B. Gultekin, // IEEE Trns. On Industry Applications. – 2010. – vol. 46. - # 1. – P 1
44. Shmilovitz, D. (2005). On the definition of total harmonic distortion and its effect on measurement interpretation. IEEE Transactions on Power Delivery, 20 (1), 526-528.
45. Sobczynski, D. (2015). A concept of a power electronic converter for a BLDC motor drive system in aviation. Aviation, 19 (1), 36-39.
46. Z. Hanzelka, A. Bien, Power Quality Application Guide 3.1.1, Harmonics Interharmonics, Copper Development Association, 2004.